

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi d'un retrovisor lateral amb simulació numèrica i amb l'experimentació en un túnel de vent

MEMÒRIA

Autor: LLORET ROCA, ROGER

Director/s: TRILLAS GAY, ENRIQUE

Convocatòria: Setembre 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'objectiu d'aquest treball és analitzar l'eficiència aerodinàmica del retrovisor d'un turisme a partir de l'experimentació amb el túnel de vent i simulacions numèriques. També es vol comparar les diferències entre aquests dos mètodes d'anàlisi i determinar si el retrovisor estudiat està ben dissenyat. Finalment, es proposarà una millora en el seu disseny.

Per analitzar aquesta eficiència aerodinàmica s'ha estudiat el coeficient de resistència a l'avanç i el comportament del flux d'aire al voltant del retrovisor.

Primer de tot, s'ha realitzat l'experimentació amb el túnel de vent de l'ETSEIB. S'han recollit lectures de la velocitat de l'aire dins la cambra d'assaig amb una sonda de Prandtl i de la força de resistència a l'avanç amb els sensors de la balança. Amb aquestes dades s'ha obtingut el coeficient de resistència a l'avanç del retrovisor. També s'ha estudiat la forma de les línies de corrent al voltant del retrovisor durant l'assaig.

En segon lloc, s'han realitzat diverses simulacions amb el programari d'ANSYS CFX per diferents velocitats de l'aire. S'ha analitzat el coeficient de resistència a l'avanç, la forma de les línies de corrent i la distribució de pressió i velocitats.

Un cop acabats els dos tipus d'anàlisis s'han comparat els resultats d'ambdós i s'han analitzat les diferències. Amb el resultat del coeficient de resistència a l'avanç definitiu, s'ha creat diferents dissenys per reduir el coeficient, i així millorar l'eficiència aerodinàmica del retrovisor.

Com a conclusió es quantifica l'eficiència aerodinàmica del retrovisor estudiat i es proposa una millora del disseny del retrovisor.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	5
1. INTRODUCCIÓ	7
2. OBJECTIUS DEL TREBALL	8
3. ABAST DEL PROJECTE	9
4. INTRODUCCIÓ A L'AERODINÀMICA: CONCEPTES BÀSICS	10
4.1. Número de Reynolds	10
4.2. Capa límit.....	11
4.3. Línies de corrent	12
4.4. Forces aerodinàmiques	13
4.4.1. Coeficient de resistència a l'avanç.....	14
4.4.2. Coeficient de resistència a l'avanç en funció del número de Reynolds	15
4.4.3. Coeficient de sustentació.....	17
5. METODOLOGIA	19
5.1. Comparació dels dos mètodes d'anàlisi	19
5.2. Computational Fluid Dynamics (CFD)	20
5.2.1. En què consisteix la dinàmica computacional de fluids?	20
5.2.2. Procediment de simulació amb CFD	21
5.2.3. Geometria	22
5.2.4. Mallat	23
5.2.5. Condicions de contorn	26
5.2.6. Paràmetres de la simulació.....	27
5.2.7. Visualització de resultats.....	28
5.3. El túnel de vent	29
5.3.1. Què és un túnel de vent?	29
5.3.2. Funcionament del túnel de vent.....	30
5.3.3. Objectius de l'experimentació	31
5.3.4. Preparació del túnel de vent	32
5.3.5. Obtenció de dades.....	32
6. RESULTATS	37
6.1. Resultats de la simulació en CFX.....	37
6.1.1. Y plus.....	38

6.1.2.	Coeficient de resistència a l'avanç i coeficient de sustentació.....	40
6.1.3.	Distribució de pressions.....	41
6.1.4.	Distribució de velocitats	43
6.1.5.	Línies de corrent	44
6.2.	Resultats experimentals del túnel de vent.....	46
6.2.1.	Dades experimentals	46
6.2.2.	Força d'arrossegament en funció de la velocitat del fluid	47
6.2.3.	Coeficient de resistència a l'avanç en funció del número de Reynolds	49
6.2.4.	Línies de corrent al voltant del retrovisor	51
7.	COMPARACIÓ DELS RESULTATS	55
7.1.	Coeficient de resistència a l'avanç i coeficient de sustentació.....	55
7.2.	Línies de corrent	57
8.	MILLORA DEL DISSENY DEL RETROVISOR	58
8.1.	Variació del C_D segons la geometria	58
8.2.	Propostes de millora	59
8.3.	Coeficients de resistència a l'avanç de les propostes de disseny	62
9.	PLANIFICACIÓ TEMPORAL	67
10.	PRESSUPOST	69
10.1.	Consideracions prèvies.....	69
10.2.	Mesures	69
11.	IMPACTE AMBIENTAL	73
	CONCLUSIONS	74
	BIBLIOGRAFIA	75
	Referències bibliogràfiques.....	75
	Bibliografia complementària.....	76
A.	ANNEX	78
A.1.	Resultats de les simulacions amb CFD del disseny base per diferents velocitats	78
A.2.	Deducció de l'equació 8.2	80
A.3.	Dades tècniques del túnel de vent	82
A.4.	Correlació número de setmanes/dies del diagrama de Gant.....	84

1. Introducció

Un dels objectius més importants de la indústria de l'automoció és reduir el consum dels cotxes, i conseqüentment, reduir les emissions a l'atmosfera. Algunes vies per assolir aquest objectiu són reduir la mida o el pes del vehicle, millorar l'eficiència del motor (o utilitzar un elèctric) o reduir el la seva resistència aerodinàmica. Els vehicles amb cossos aerodinàmics ajuden a que aquesta resistència sigui menor, però els elements exteriors enganxats als cossos l'afecten negativament de manera considerable.

Els retrovisors laterals són un exemple d' elements exteriors del vehicle . Tanmateix, són elements indispensables en tots els vehicles que circulen per carretera, ja que sense ells el transport no seria tan segur com ho és actualment. Per això, els dissenyadors d'automòbils estudien amb molt de detall com millorar-los en cada model nou de vehicle. Si ens fixem en diferents tipus d'automòbils podem observar perfectament com l'estil dels retrovisors canvia en cada un. Per exemple, els dels cotxes esportius sempre són més petits que els cotxes familiars. Això és degut als dos factors importants que es tenen en compte a l'hora de dissenyar retrovisors : la estètica i el comportament aerodinàmic.

Aquest treball es centra en el comportament aerodinàmic d'aquests i per estudiar-lo s'han utilitzat les dos eines que fan servir les escuderies de Fórmula 1 per millorar contínuament l'aerodinàmica dels monoplaques: la simulació numèrica i el túnel de vent. Cada una té els seus avantatges i inconvenients que es comentaran més endavant.

2. Objectius del treball

En aquest treball s'ha estudiat el comportament aerodinàmic d'un retrovisor lateral de turisme amb dos metodologies. Per una banda s'ha realitzat l'anàlisi experimental en el túnel de vent i per l'altra s'ha utilitzat la simulació numèrica per fer l'estudi teòric. D'aquesta manera es poden comparar els resultats de les dues i definir quina s'ajusta més a la realitat.

Cadascun dels dos mètodes d'anàlisi tenen els seus avantatges i inconvenients (que ja es veuran més endavant), però a partir d'ells es pot saber si el retrovisor té un bon comportament envers els fluxos d'aire, és a dir, si està ben dissenyat. El paràmetre clau en els estudis és el coeficient d'arrossegament, *drag coefficient* en anglès, que indica la resistència d'un objecte en un medi fluid, perquè es vol que aquesta resistència sigui mínima per gastar el mínim de combustible.

Els **objectius principals** d'aquest estudi són:

- Estudiar amb simulació numèrica el comportament aerodinàmic del retrovisor.
- Estudiar amb el túnel de vent el comportament aerodinàmic del retrovisor.
- Identificar les diferències entre la simulació numèrica i l'anàlisi amb el túnel de vent.
- Calcular el coeficient d'arrossegament del retrovisor estudiat (C_D). Està ben dissenyat?
- Analitzar com afecta la geometria del retrovisor al flux d'aire que envolta el turisme.

A part dels objectius generals també existeixen uns **objectius complementaris**. Aquests no consisteixen en resultats o anàlisis, sinó que són habilitats o coneixement que es vol haver adquirit a la finalització del treball. Els objectius complementaris són:

- Aprendre a realitzar simulacions amb el programari ANSYS CFX.
- Conèixer i entendre com es realitzen els experiments amb el túnel de vent.
- Profunditzar els coneixements de com afecta un flux d'aire a un element d'un turisme.
- Millorar les habilitats d'organització i planificació.

3. Abast del projecte

Primer de tot s'explicarà de forma breu la base teòrica dels paràmetres estudiats i la metodologia emprada per realitzar els anàlisis. Després s'exposarà els dos estudis fets: l'experimentació amb el túnel de vent i la simulació numèrica amb els seus resultats. Amb aquestes dades es compararan els dos resultats. Tot i que descobrir si el retrovisor està ben dissenyat aerodinàmicament queda dins l'abast del projecte, queda fora de l'abast la normativa del disseny de retrovisors pel que fa a la seguretat vial.

4. Introducció a l'aerodinàmica: conceptes bàsics

Per poder entendre els resultats dels anàlisis d'aquest treball cal abans una breu explicació dels conceptes clau que apareixen al llarg d'aquests.

4.1. Número de Reynolds

El número de Reynolds és un número adimensional que s'utilitza per caracteritzar el moviment d'un fluid. És el quocient entre els termes de inèrcia i els termes viscosos. [1]

El número de Reynolds es defineix com:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{\text{forces inercials}}{\text{forces viscoses}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

On: L és la longitud característica del cos

μ és la viscositat dinàmica del fluid

ρ és la densitat del fluid

V és la velocitat del fluid

Aquest número indica el tipus de flux: laminar o turbulent. Hi ha un rang de valors on no es pot definir 100% el flux com a turbulent o laminar, sinó que apareix una zona de transició tal i com es pot veure en la *taula 4.1*.

Tipus de flux	Re
Laminar	<2000
Turbulent	>4000

Taula 4.1. Valors del número de Reynolds segons tipus de flux. [10]

Un **flux turbulent**, és a dir, amb un Reynolds superior a 4000, és dominat per les forces d'inèrcia. És el tipus de flux més comú, però més difícil de simular. La trajectòria de les partícules són irregulars i apareixen vòrtexs i remolins aleatoris i impredecibles.

En canvi, un **flux laminar** és dominat per les forces viscoses. Per tant, la velocitat del fluid es baixa en comparació amb el flux turbulent, les partícules del fluid es mouen en línia recta i és molt senzill de simular.

4.2. Capa límit

La capa límit és una zona on el moviment del fluid és pertorbat a causa de la presència d'un sòlid amb el que està en contacte. En aquesta zona la velocitat del fluid varia entre 0 i el 99% de la velocitat del fluid en la zona no pertorbada.

La capa límit pot ser **laminar**, **turbulenta** i hi pot haver-hi una zona de **transició**, tal i com es pot observar en la *figura 4.2*. En aquesta figura hi ha representada la capa límit al llarg d'una placa plana. Tots els punts del fluid en contacte amb la placa compleixen la condició d no lliscament i tenen velocitat nul·la.

El tipus i l'alçada de la capa límit depèn del número de Reynolds. Per exemple, en el cas de la placa plana la capa límit és laminar fins a un $Re = 5 \cdot 10^5$, però aquest valor és diferent per cada tipus de geometria.

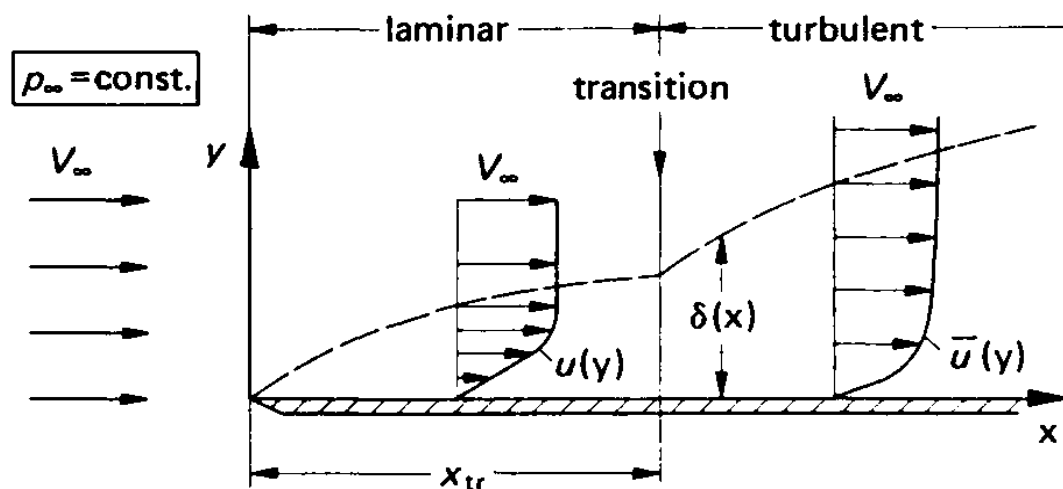


Figura 4.2. Capa límit al llarg d'una placa plana. [2]

Quan hi ha un canvi abrupte de geometria (el flux no és capaç d'adherir-se al sòlid) o apareix un gradient desfavorable de pressions hi pot haver la **separació de la capa límit**. En l'esquema de la *figura 4.3* es mostren tres casos:

- En el primer no hi ha cap gradient de pressions.
- En el segon cas hi ha un gradient desfavorable de pressions però no separació. El flux dins la capa límit es retarda, especialment a prop de la paret.
- En el tercer cas hi ha un gradient desfavorable de pressions i separació.

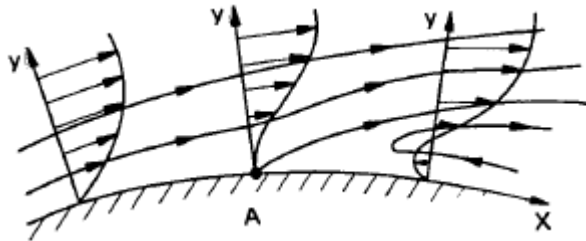


Figura 4.3. Representació de la separació de la capa límit en una paret. [2]

Quan hi ha separació es crea una zona de vòrtexs que s'anomena **estela**. Es una zona de calma, on el fluid està molt desaccelerat, i els vòrtexs consumeixen una gran quantitat d'energia que donen a lloc a grans pèrdues de pressió.

Les capes límit de tipus turbulent poden suportar gradients desfavorables de pressions més elevats sense produir-se separació perquè la turbulència condueix a un transport intensiu d'impuls del flux exterior cap a la paret.

4.3. Línies de corrent

Una línia de corrent és el lloc geomètric dels punts tangents al vector de velocitat de les partícules de fluid en un instant de temps determinat. Per definició les diferents línies de corrent d'un flux en un mateix instant no es creuen, ja que una partícula del fluid no pot tenir dos velocitats diferents al mateix punt. [1]

Les línies de corrent es poden observar en els assajos experimentals de diferents maneres. Per exemple, en l'assaig de la *figura 4.4* s'ha utilitzat fum com a indicador de les línies de corrent. En el cas del retrovisor estudiat s'han utilitzat fils per observar-les.



Figura 4.4. Assaig en el túnel de vent de Volkswagen AG on es veuen les línies de corrent en la secció longitudinal mitja d'un VW Golf I. [2]

4.4. Forces aerodinàmiques

La força aerodinàmica total que rep un cos es divideix en dos components: la resistència a l'avanç (*drag*) i la força de sustentació (*lift*). La resistència a l'avanç és la component paral·lela a la velocitat del fluid que actua sobre el cos i la sustentació és la component perpendicular, tal i com es pot observar en la *figura 4.5*.

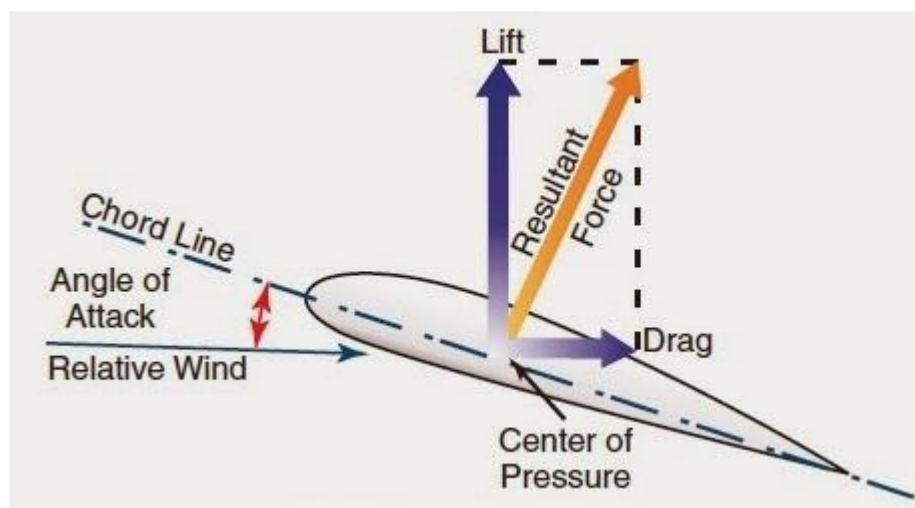


Figura 4.5. Representació de la força de sustentació (*lift*) i la resistència a l'avanç (*drag*) en un perfil alar. [10]

Cada una de les forces és proporcional a un coeficient que només depèn de la geometria del cos. Aquests coeficients (adimensionals) són el coeficient de resistència a l'avanç (C_D) i el coeficient de sustentació (C_L).

4.4.1. Coeficient de resistència a l'avanç

El coeficient de resistència a l'avanç engloba els efectes de dos contribucions bàsiques al arrossegament dinàmic del fluid: l'arrossegament de pressió i la fricció de la superfície.

La **fricció de la superfície** (D_f) és la força produïda degut a la fricció molecular que apareix quan hi ha un gradient de velocitats del fluid en la paret del cos. És la component principal de la F_D en fluxos 2-D viscosos en absència de separació.

L'**arrossegament de pressió** (D_p) també és degut a tensions tallants en les parets com la fricció de la superfície. No obstant, aquesta força és deguda a gradients de pressió elevats que causen separació. Per tant, aquesta component és la predominant en cossos roms i en el cas del retrovisor.

Llavors la resistència a l'avanç total és la suma d'aquestes dos components:

$$F_D = D_f + D_p \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Pel que fa el coeficient de resistència a l'avanç, es defineix com:

$$C_D = 2 * \frac{F_D}{A * \rho * V^2} \quad (\text{Eq 4.3})$$

On: - F_D és la força de resistència a l'avanç

- A és l'àrea frontal de l'objecte

- ρ és la densitat del fluid

- V és la velocitat del vehicle en el nostre cas

En un turisme de mida normal la resistència a l'avanç a 100 km/h consisteix el 80% de la resistència total [2]. Per això el coeficient de resistència a l'avanç és un dels focus quan s'estudia l'aerodinàmica d'un turisme, ja sigui per millorar el consum o la velocitat màxima.

Al llarg de tota la història sempre s'ha intentat reduir aquest coeficient millorant el disseny dels automòbils. Tot i que en la *figura 4.6* es pot veure com a partir dels anys 60 la reducció del C_D es va estancar per sobre 0,4, en les últimes dècades s'ha pogut baixar sota 0,3.

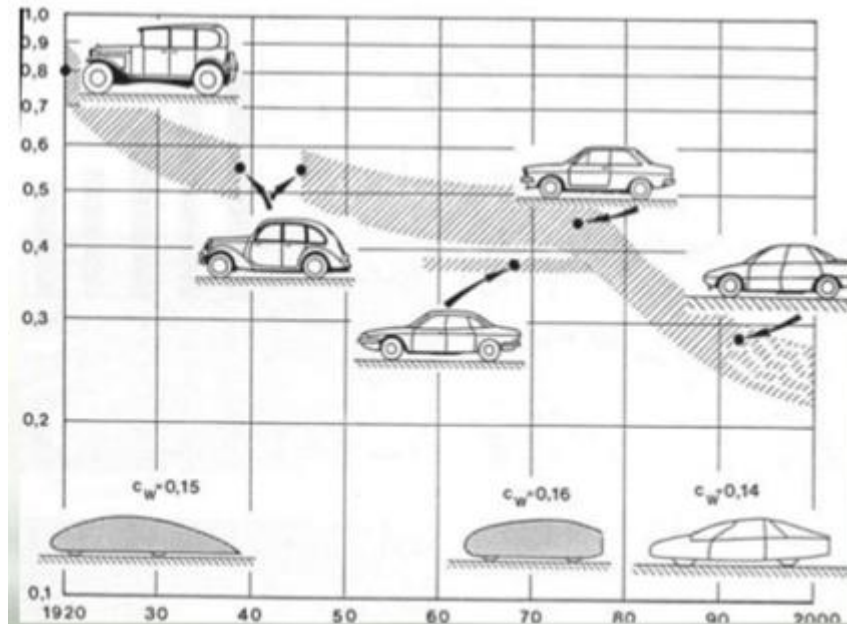


Figura 4.6. Evolució del C_D dels automòbils entre el 1920 i el 2000. [2]

4.4.2. Coeficient de resistència a l'avanç en funció del número de Reynolds

El C_D està directament relacionat amb el número de **Reynolds**, la **geometria** del cos i la **rugositat** de la superfície del cos, tal i com s'observa en la *figura 4.7*. Aquests factors són els que influeixen en la localització del punt de separació de la capa límit, el qual crea una estela darrere el objecte que incrementa la resistència aerodinàmica del cos.

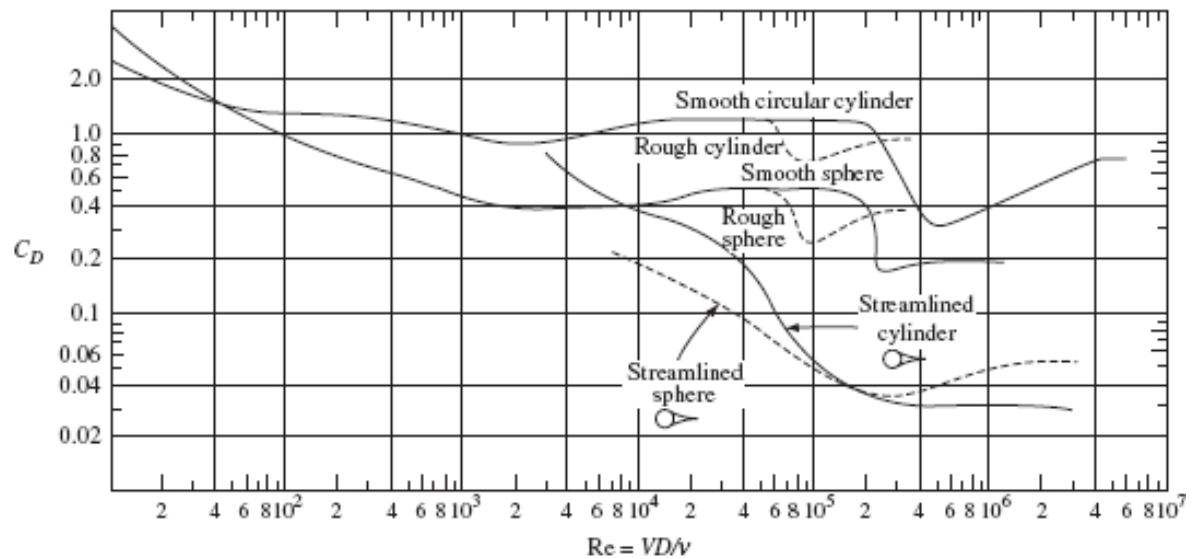


Figura 4.7. Representació del coeficient de resistència a l'avanç en funció del nombre de Reynolds per diferents cossos. [4]

Per exemple, per cossos semblants a una esfera hi ha una zona on el C_D és quasi constant per tots els Re entre $2 \cdot 10^4$ i $2 \cdot 10^5$. En aquest rang de valors la capa límit és laminar, i quan el valor del coeficient comença a disminuir bruscament és quan el punt de separació de la capa límit es comença a moure. Aquest efecte es produeix quan s'assoleix el Reynolds crític, que dona lloc a una transició sobtada cap a una capa límit turbulenta.

En la figura 4.8 es compara la separació de la capa límit segons sigui laminar o turbulenta. Es poden obtenir les conclusions següents:

- Quan la capa límit és **laminar** la estela és ample i per tant el C_D és alt.
- Quan la capa límit és **turbulenta** la capa límit roman unida al cos més tros, la estela es torna més petita i per tant disminueix la resistència aerodinàmica.

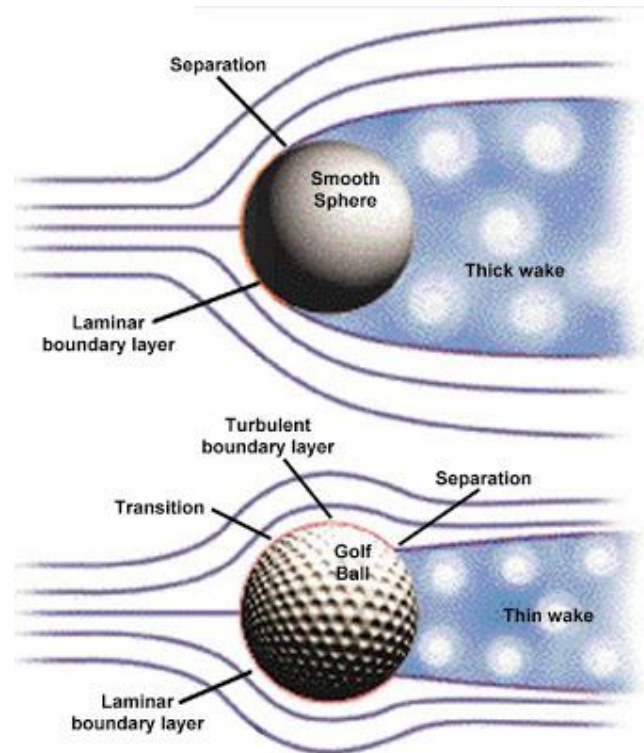


Figura 4.8. Representació de la separació amb una capa límit laminar i una turbulenta. [6]

Per cossos amb extrems punxeguts el punt de separació de la capa límit serà el mateix per tots els valors de Re (sense contar els Re petits) i per tant el c_D no variarà segons Re .

Quan els cossos tenen una alta rugositat la disminució del c_D apareix abans, ja que la capa límit turbulenta també apareix abans degut a aquesta rugositat [2].

4.4.3. Coeficient de sustentació

El coeficient de sustentació relaciona la força de sustentació que rep un cos amb la densitat del fluid al voltant del cos, la velocitat del fluid i una àrea de referència associada.

Es defineix com:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (\text{Eq 4.4})$$

- On:
- F_L és la força de sustentació
 - A és l'àrea paral·lela al fluid de l'objecte
 - ρ és la densitat del fluid
 - V és la velocitat del vehicle en el nostre cas

En els monoplaques de Fórmula 1 es busca una sustentació negativa, és a dir, que el monoplaça sigui empès contra el terra, per aconseguir una millor adherència. En canvi, en els turismes, aquesta sustentació no és tan important ja que els automòbils no estan sota condicions tan extremes.

Pel que fa els retrovisors, el coeficient de sustentació té un valor negligible i la sustentació que es produeix degut a aquests elements és mínima. Per altra banda, la resistència a l'avanç és molt important en aquest estudi perquè la contribució del coeficient de resistència a l'avanç dels retrovisors al coeficient total del cotxe és significativa.

Per tant, el C_D és el paràmetre a optimitzar. Segons Wolf-Heinrich Hucho un retrovisor està ben dissenyat quan el seu C_D està al voltant de 0,5 [2].

5. Metodologia

Per estudiar les característiques aerodinàmiques del retrovisor s'ha utilitzat la simulació numèrica i el túnel de vent, tal i com s'ha comentat anteriorment.

Fins fa pocs anys, la metodologia de disseny i optimització d'automòbils era el mètode d'encert-error. És a dir, es provaven implementacions: si funcionaven bé s'aplicaven al disseny i si no ho feien es descartaven o s'intentaven millorar. Aquest mètode és lent i, sobretot, car. La simulació numèrica (*CFD*) i els túnels de vent han aconseguit abaratir els costos i escurçar el temps de disseny.

En aquest capítol s'exposen els procediments emprats en la simulació i en l'assaig experimental. Abans però, veurem perquè els enginyers utilitzen un o altre depenent de l'estudi que hagin de realitzar.

5.1. Comparació dels dos mètodes d'anàlisis

A l'hora d'estudiar el comportament aerodinàmic d'un objecte es pot triar entre fer-ho experimentalment o teòricament (o ambdós), però cal tenir clar que cadascun dels mètodes té els seus avantatges i inconvenients.

En primer lloc, el cost d'experimentació en el túnel de vent és molt alt, mentre que per les simulacions numèriques només cal pagar el cost de la llicència del software. Poques empreses disposen d'un túnel de vent propi i llogar-ne un surt molt car. A més a més, existeix programari lliure de dinàmica computacional de fluids anomenat *FEATFLOW*, tot i que el més usat és el *FLUENT* d'*ANSYS*.

Un altre avantatge de la simulació numèrica respecte el túnel de vent és que es portable. Es poden realitzar simulacions a qualsevol lloc amb un ordinador portàtil, gràcies a que la capacitat dels ordinadors ha augmentat considerablement els últims anys. No obstant, és important saber que simulacions molt complexes poden requerir gran capacitat computacional. Pel que fa el túnel de vent, s'ha de tenir unes instal·lacions fixes de grandària suficient per contenir-hi el material d'experimentació com pot ser el mateix túnel.

La mida de la peça estudiar també és un limitant en el túnel de vent. No és el mateix estudiar un monoplaça sencer o una part d'un avió que una peça petita. Conseqüentment com més gran hagi de ser el túnel de vent més gran serà la seva despesa energètica i el cost de les instal·lacions. En canvi la mida, no és un limitant per la simulació numèrica.

El gran avantatge del túnel de vent davant la simulació numèrica és la seva **fiabilitat**. Els resultats del túnel de vent són reals, però els resultats de un estudi amb simulació numèrica poden ser no 100% fiables [10]. Aquesta manca de fiabilitat és deguda a:

-Incertesa: falta de precisió dels resultats degut al desconeixement, ja sigui del tipus de model de comportament del fluid o de qualsevol característica influenciable.

-Errors: són deficiències reconegudes. Aquests errors poden ser deguts a simplificacions, problemes de discretització, errors d'arrodoniment, criteris de convergència dolents o simplement "bugs" del programari. Moltes vegades els comportaments dels fluids són molt complexes i s'estudien amb models simplificats que poden donar lloc a errors. En altres paraules, la precisió dels resultats està limitada en la potència de càlcul disponible.

Per exemple, ara mateix el CFD no és pràctic en la majoria dels casos amb flux turbulent extern.

A continuació s'exposa amb més detall aquestes dos eines d'anàlisi.

5.2. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Per la simulació numèrica s'ha utilitzat el programari Fluid Flow CFX d'ANSYS que és un software que està basat en la dinàmica computacional de fluids.

5.2.1. En què consisteix la dinàmica computacional de fluids?

La dinàmica computacional de fluids (CFD en anglès) és la branca de la mecànica de fluids que utilitza algorismes i anàlisis numèric per solucionar i analitzar problemes que involucren fluxos de fluids. El seu funcionament està basat en el **mètode de volums finits**, és a dir, el domini és discretitzat en un conjunt de volums de control. Llavors a cada volum de control es resolen les equacions generals de conservació: de la massa, el moment, l'energia, etc.

Per poder resoldre numèricament les equacions, les equacions parcials diferencials es discretitzen en un sistema algebraic d'equacions. Un cop comença la simulació les equacions es van resolent iterativament fins a que els residus són tan petits com desitgem. Els residus són a cada iteració la diferència entre la solució de les equacions per aquella iteració i el valor estimat de la variable d'interès.

Podem indicar al software quin és el mínim i el màxim número d'iteracions que volem per la simulació, ja que un número massa petit d'iteracions pot donar un resultat imprecís i un número gran pot necessitar molts recursos (temps i càrrega computacional).

5.2.2. Procediment de simulació amb CFD

El procés de simulació amb el software CFX es divideix principalment en 5 etapes, que apareixen en la pantalla principal de l'ANSYS Workbench CFX (figura 5.1):

- **Geometry:** és on es crea la geometria del problema. Es defineix el domini que es vol estudiar.
- **Mesh:** consisteix en la discretització del domini en petits elements.
- **Setup:** es defineixen les propietats del fluid, les condicions de contorn i totes les característiques de simulació.
- **Solver:** consisteix en el procés iteratiu de simulació en si. Apareixen l'evolució residus i els punts de control (monitor points) al llarg de les iteracions.
- **Results:** és on es poden trobar els resultats de la simulació i analitzar-los creant figures, gràfics, etc.

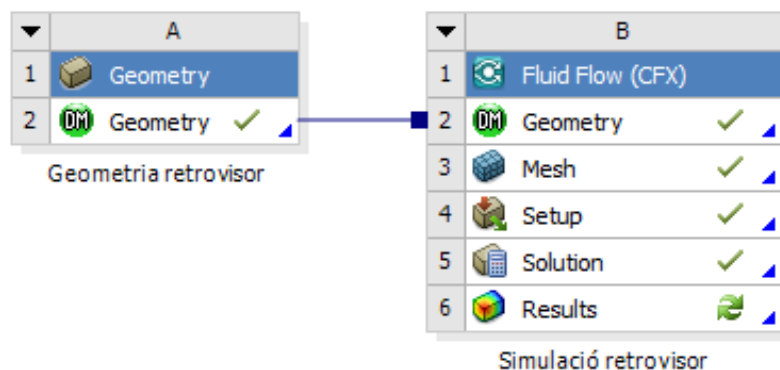


Figura 5.1. Menú del CFX amb les 5 etapes de la simulació. (Font: elaboració pròpia)

A continuació s'exposa com s'ha dut a terme la configuració de la simulació.

5.2.3. Geometria

La geometria del problema s'ha creat amb el software *Solidworks*. La geometria està formada pel propi retrovisor, que és l'obstacle que es troba el fluid, i el domini, que és la zona per on circularà el fluid que volem estudiar. El retrovisor s'ha representat a escala 1:1 (*figura 5.2*) i s'han aproximat algunes parts de la geometria, com el forat pels cargols del suport o la part del mirall interior, que tenen una influència baixa al flux d'aire.



Figura 5.2. Imatge del retrovisor real (esquerra) i de la seva representació amb *Solidworks* (dreta). (Font: elaboració pròpia)

El domini s'ha creat prou gran per evitar que el comportament del fluid al voltant del retrovisor es vegi afectat per els límits del domini. Aquest consisteix d'un cub de 8 m^3 , és a dir, de 2 metres de costat, com el de la figura 5.3.

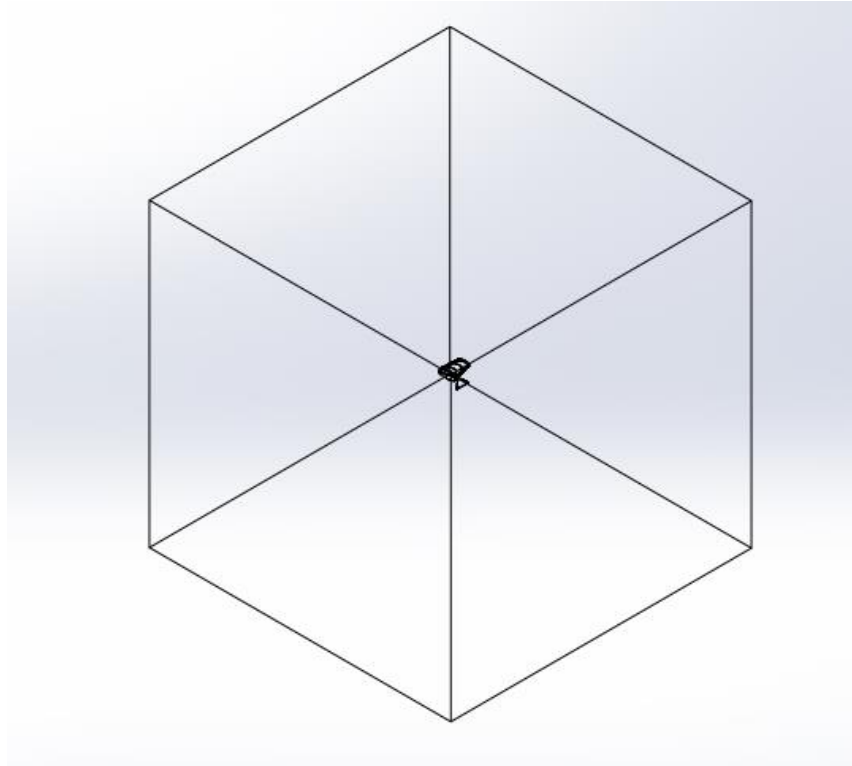


Figura 5.3. Límits del domini. En el centre el retrovisor (que no forma part del domini). (Font: elaboració pròpia)

El retrovisor està col·locat al centre del domini, per tant els límits del domini s'allunyen com a mínim 1 metre del retrovisor per totes bandes. Considerant que l'alçada del retrovisor és de $0,01\text{ m}$ la mida del domini és suficientment gran perquè com el flux al voltant del retrovisor no es vegi afectat pels límits del domini. Això s'ha comprovat un cop s'ha realitzat la simulació.

5.2.4. Mallat

L'objectiu d'aquesta etapa del procés de simulació ha estat crear un mallat suficientment petit per obtenir resultats bons (**precisos**), però sense que el número d'elements sigui massa gran ja que la potència computacional és limitada. A més a més, ens interessa que el temps de simulació sigui el més curt possible mantenint una bona convergència dels resultats. El mallat creat es pot veure en la figura següent:

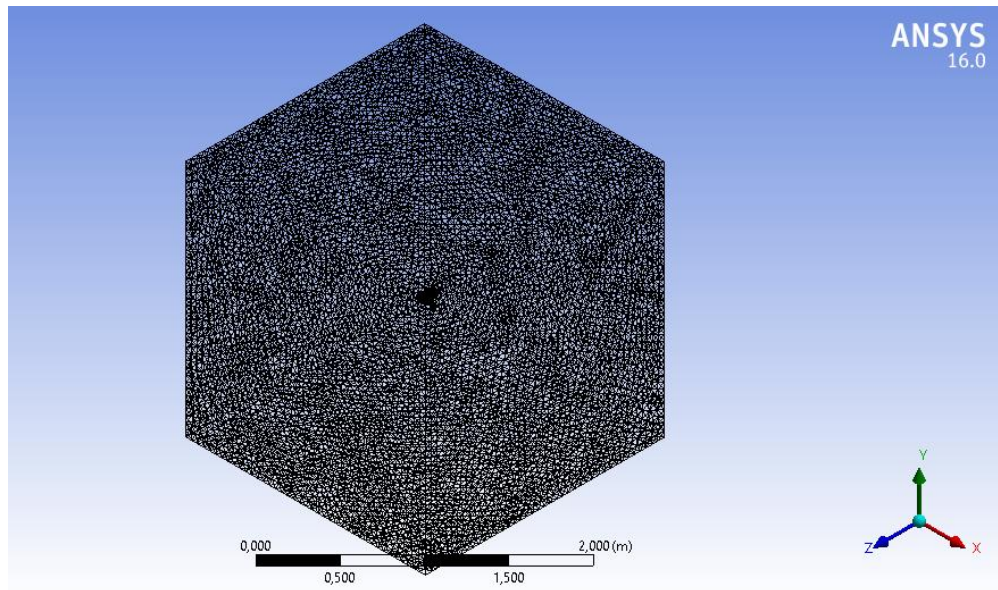


Figura 5.4. Malla del domini a estudiar. (Font: elaboració pròpia)

És important que els elements de mida petita es localitzin al voltant del retrovisor, ja que és la zona que ens interessa analitzar i és on apareixerà l'efecte de capa límit. En zones allunyades del retrovisor la velocitat del fluid no es veurà afectada per la geometria i no cal tenir uns elements tan petits.

Si es fa un tall per la meitat del domini es pot veure com els elements situats al voltant del retrovisor són molt més petits que els exteriors, tal i com s'acaba de comentar:

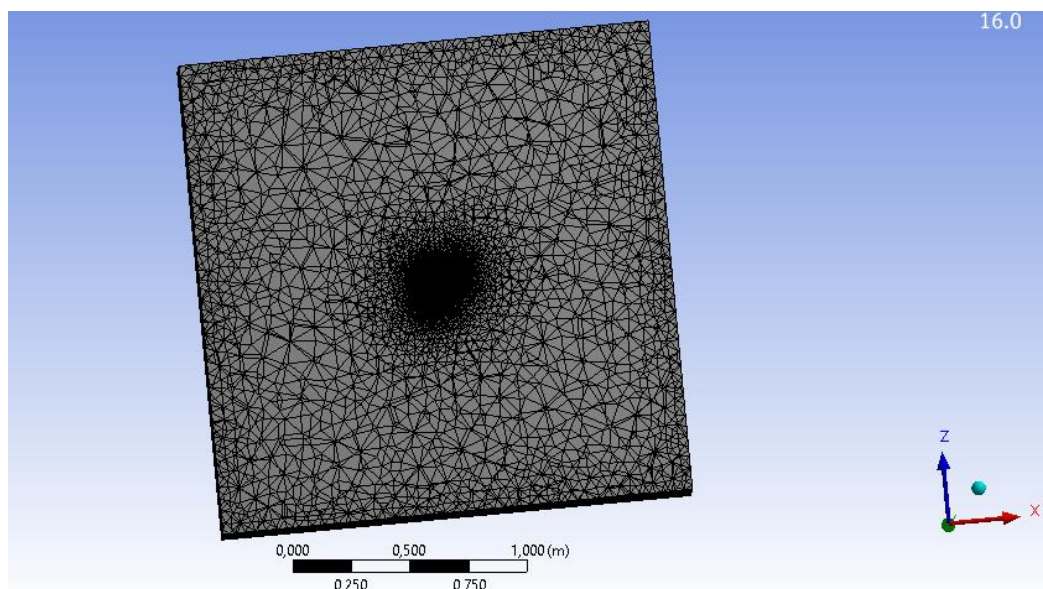


Figura 5.5. Malla del domini vista des de un pla paral·lel al mirall que passa per el centre del retrovisor. (Font: elaboració pròpia)

Per assolir aquest objectiu s'ha creat una malla fina amb les següents característiques:

-**"Face sizing"** en la superfície del retrovisor. Aquesta característica permet limitar la grandària dels elements en contacte amb la paret (retrovisor).

-**"Inflation"** des de la paret del retrovisor amb una alçada de la primera capa d'elements de xx. Aquesta característica produeix que des de la paret del retrovisor la mida dels elements vagi augmentant progressivament. S'ha fixat una capa de 15 elements amb un creixement progressiu de 1,5. Gràcies això la precisió de la simulació augmentarà considerablement.

Aquestes característiques es poden observar perfectament en la *figura 5.6*. Consisteix en la *figura 5.5* ampliada. Al voltant de la geometria del retrovisor hi trobem les capes fines d'elements on la seva mida va augmentant en cada capa.

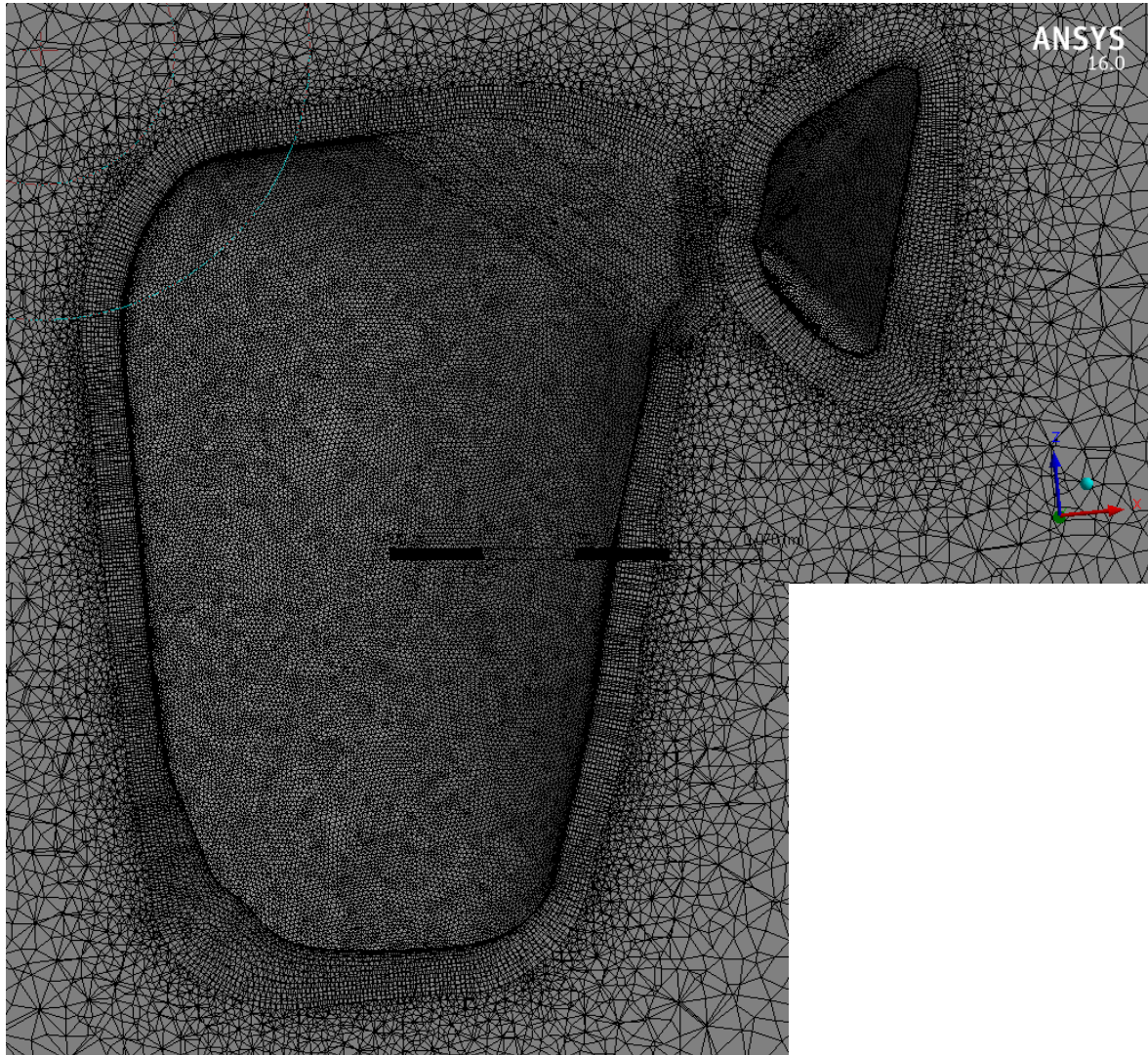


Figura 5.6. Imatge de la malla al voltant de la paret del retrovisor. (Font: elaboració pròpia)

Com es sap si la malla és prou fina?

Un bon indicador per a la bondat de la malla és la **y+**. La y+ és un paràmetre adimensional que s'utilitza per descriure com de fina és la malla per un flux en concret [7]. La y+ està definida com:

$$y+ = \frac{y \cdot u_*}{\nu} \quad (\text{Eq 5.1})$$

On y és l'alçada del primer element (al costat de la paret), u_* la velocitat de fricció a la paret i ν la viscositat cinemàtica del fluid.

Segons el manual del CFX *ANSYS Inc* [10] el valor de la y+ hauria de ser inferior a 20. Per tant, un cop acabada la simulació comprovarem aquest paràmetre per veure si els resultats es poden considerar com a vàlids.

5.2.5. Condicions de contorn

S'han assignat quatre condicions de contorn, que estan representades en la *figura 5.7*. S'ha considerat, de la mateixa manera que en l'experimentació amb el túnel de vent, que el flux d'aire és perpendicular al mirall del retrovisor.

- **Inlet:** que correspon a l'entrada de l'aire en el domini. S'ha imposat que per la cara del cub posterior al mirall entri un flux subsònic d'aire amb una velocitat de *80 km/h*. Aquesta és una velocitat que podria tenir el vehicle en moviment i és una de les velocitats de l'aire amb que es va experimentar en el túnel de vent.
- **Outlet:** que correspon a la sortida de l'aire del domini. En la cara del cub de davant del mirall (la sortida de l'aire) s'ha imposat una pressió relativa de *0 Pa*. Això indica que la pressió a la sortida és la mateixa que la de referència (*1 atm*).
- **Wall:** és tota la superfície del retrovisor. Es considera un obstacle sòlid per l'aire, és a dir, com una paret. Té la condició de no lliscament.
- **Symmetry:** tenen aquesta condició de contorn totes les cares del cub que no són l'inlet o l'outlet. Aquesta condició imposa que el flux d'aire en aquestes quatre cares és simètric, ja que com estan allunyades del retrovisor hauria de ser el mateix.

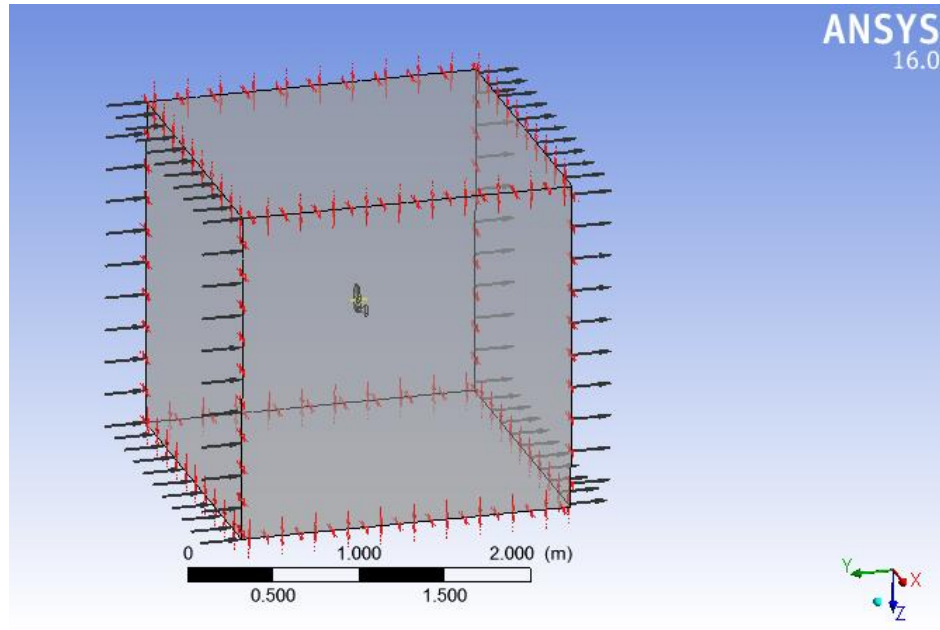


Figura 5.7. Domini en el CFX amb les condicions de contorn imposades. (Font: elaboració pròpia)

5.2.6. Paràmetres de la simulació

La simulació estacionària s'ha realitzat tenint en compte els següents paràmetres:

Pressió de referència: s'ha utilitzat com a pressió de referència *1 atm*. Aquesta pressió és molt semblant a la que hi havia al laboratori en el moment de l'assaig i a la que tindria el retrovisor en el seu ús normal en l'automòbil.

Material: Per la simulació s'ha utilitzat el material *Aire a 25°C* com a fluid, el mateix tipus de material que es va utilitzar per l'assaig experimental en el túnel de vent. (La temperatura del laboratori era de 25 °C i el fluid usat era aire)

Model de turbulència: s'ha utilitzat el model **SST** (*Shear Stress Transport*) com a model de turbulència per a la simulació. Aquest model combina els models *k-omega* i *k-epsilon*. En concret, utilitza el *k-omega* en la regió interior de la capa límit i el *k-epsilon* en la regió on el flux és lliure. Això és així perquè el *k-epsilon* no és adequat per fluxos amb separació de capa límit (falla en la seva predicció) i el *k-omega* és sensible a les condicions de flux lliure.

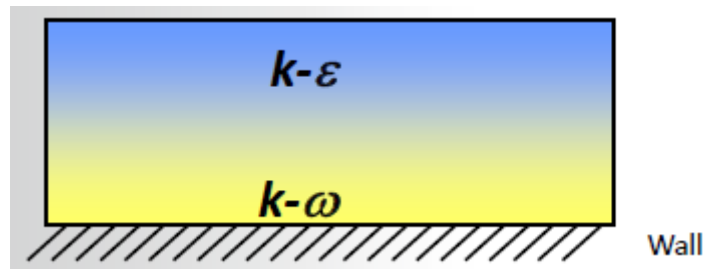


Figura 5.8. Distribució dels models de turbulència segons distància a la paret. [10]

Número d'iteracions: com s'ha explicat anteriorment el CFD resol les equacions iterativament. S'ha assignat com a 200 el número màxim d'iteracions.

Residus: per a uns bons resultats es necessita una bona convergència de la solució. Per aquest motiu s'ha configurat perquè la simulació acabi un cop s'arribi al màxim número d'iteracions o els residus siguin inferiors a 10^{-5} . Els residus són una magnitud que ens ajuda a veure si els canvis en la solució entre una iteració i la següent són negligibles. Com a indicador dels residus s'usa el mètode **RMS** (*Root mean square deviation*) que es defineix com:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N x_{1,n} - x_{2,n}}{N}} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

On $x_{1,n}$ i $x_{2,n}$ són els valors dels punt n en la iteració 1 i en la iteració 2 respectivament, i N el total de punts.

Finalment, cal remarcar que s'ha realitzat la simulació amb la hipòtesis isotèrmica: tot el fluid està a 25 °C.

5.2.7. Visualització de resultats

Per poder visualitzar com varia el valor al llarg de la simulació d'algunes de les variables d'interès s'ha creat una sèrie de **punts de control** (*monitor points*). Aquests punts són:

-Drag coefficient: representa el coeficient de resistència a l'avanç del retrovisor i el seu valor és calculat a partir de l'equació 4.3.

-Lift coefficient: representa el coeficient de sustentació del retrovisor i el seu valor és calculat a partir de l'equació 4.4.

5.3. El túnel de vent

5.3.1. Què és un túnel de vent?

Un túnel de vent és una eina experimental per estudiar els efectes del flux d'aire sobre objectes o cossos sòlids. Són usats en diferents indústries com l'aeronàutica, la militar, l'automobilística o fins i tot en el disseny d'edificis i ponts. En el nostre cas l'utilitzarem per analitzar com varia el flux d'aire al voltant d'un retrovisor.

Els túnels de vent poden ser oberts o tancats. En els oberts l'aire entra de l'exterior a l'interior del túnel i un cop ha recorregut el túnel surt a l'exterior. En canvi, en els tancats es recicla l'aire de forma cíclica. L'avantatge d'aquest tipus de túnel de vent és que, com l'aire que surt és el mateix que torna a entrar, es poden controlar les variables termodinàmiques de l'aire (densitat, temperatura i pressió). Per altra banda, la principal desavantatge és l'alt cost i complexitat dels túnels de vent tancats, ja que s'han d'instal·lar deflectors al llarg del túnel per controlar el flux i evitar turbulències.

Per realitzar l'assaig experimental s'ha utilitzat el túnel de vent del **laboratori d'aerodinàmica de l'ETSEIB**, que és tancat com el de la *figura 5.9*.



Figura 5.9. Túnel de vent de l'ETSEIB. (Font: elaboració pròpia)

5.3.2. Funcionament del túnel de vent

El funcionament bàsic consisteix en que l'aire és impulsat per un ventilador contra l'objecte que es vol estudiar, que està subjectat per un braç de balança.

Es basa en el principi de la **reversibilitat del moviment**, que afirma que podem observar el moviment del medi respecte l'objecte immòbil enlloc del moviment de l'objecte respecte el medi immòbil. És a dir, estudiarem el flux de l'aire contra el retrovisor enlloc del moviment del retrovisor en contra de l'aire, que coincidiria amb el cas real. Això és gràcies a que les forces aerodinàmiques depenen sols del moviment relatiu entre l'objecte i l'aire.

El túnel de vent es pot dividir en quatre seccions principals: el **ventilador**, la **cambra d'assaig**, el **difusor** i el **con de contracció**. La distribució d'aquests elements al llarg del túnel de vent està representada en la *figura 5.10*, tenint en compte que l'aire que arriba a la part dreta del circuit representat torna a entrar per la part esquerra.



Figura 5.10. Representació de les parts del túnel de vent. [8]

El ventilador és qui aporta a l'aire la velocitat desitjada a l'aire. Tot just després del ventilador, l'aire flueix a través d'unes reixetes estabilitzadores per reduir el número de remolins que es produeixen al llarg del circuit.

Abans d'entrar en la cambra d'assaig, l'aire passa per un tram on la secció va disminuint que s'anomena **con de contracció**. Com que es redueix la secció, la velocitat de l'aire s'incrementa i no es creen turbulències perquè la pressió del fluid disminueix amb la superfície de la secció (*aplicació del teorema de Bernoulli*).

La cambra d'assaig és on hi ha col·locat l'objecte que s'estudia, que està subjectat per el braç de balança. També en la balança hi ha col·locats els sensors necessaris per calcular els coeficients de sustentació i/o resistència.

Finalment, després de sortir de la cambra d'assaig l'aire passa pel difusor abans de tornar a començar el circuit. El difusor té l'objectiu reduir la velocitat de sortida de l'aire i recuperar la pressió estàtica. Els difusors són molt sensibles a errors de disseny, ja que l'aire que arriba al difusor no és laminar ni uniforme i això pot crear separacions intermitents de la capa límit o vibracions en el túnel.

El túnel de vent utilitzat segueix l'esquema de la *figura 5.11*. Les parts que hi podem trobar són les mateixes que en el túnel de vent obert, excepte que apareixen deflectors. Aquests deflectors ajuden que el flux es mantingui uniforme quan la direcció del flux canvia bruscament degut a la forma del circuit del túnel.

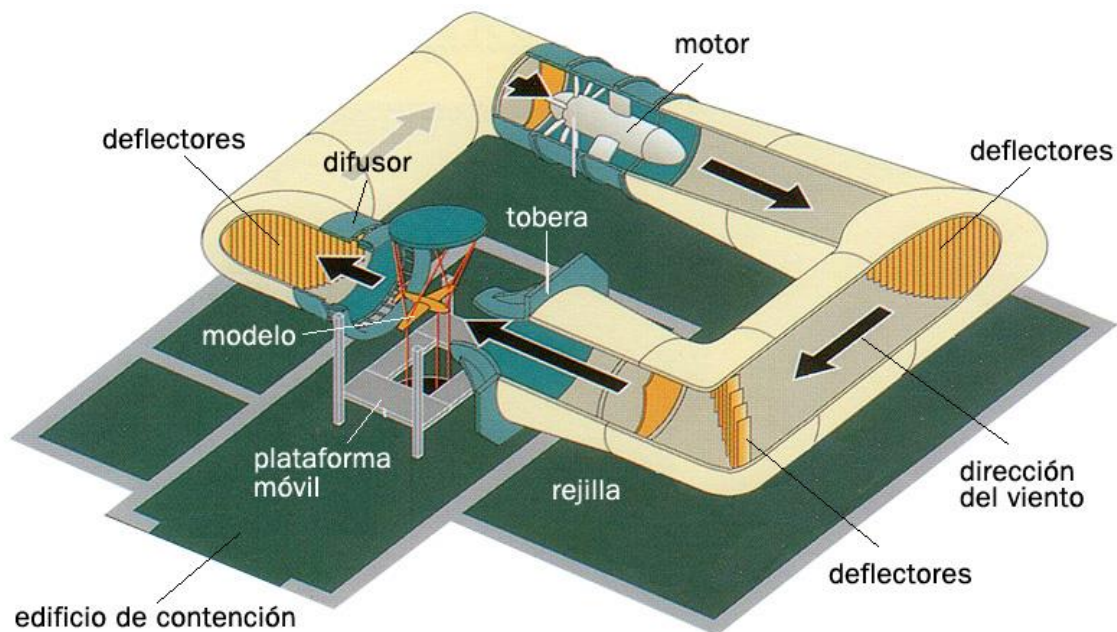


Figura 5.11. Esquema d'un túnel de vent semblant a l'utilitzat per l'experimentació. [11]

5.3.3. Objectius de l'experimentació

Els objectius de l'experiment són determinar el coeficient de resistència a l'avanç del retrovisor i observar el comportament del flux d'aire al voltant del retrovisor. Per analitzar el c_D es representarà els valors de la força de resistència a l'avanç (F_D) en funció de la velocitat de l'aire i el c_D en funció del número de Reynolds.

5.3.4. Preparació del túnel de vent

Abans de posar en marxa el túnel de vent, es va haver de realitzar un procés de preparació i d'escalfament del ventilador per dur a terme l'experiment amb un nombre de voltes constant. També, abans de començar, es va calibrar tota la instrumentació utilitzada en l'assaig experimental. Aquesta posada a punt la va realitzar el tutor del treball, l'Enric Trillas.

5.3.5. Obtenció de dades

Per assolir els objectius de l'experiment s'han recollit els valors de la F_D per diferents velocitats de l'aire. Es poden configurar diferents potències del ventilador del túnel (i per tant, diferents velocitats de l'aire) a partir del comandament principal del túnel de vent, que apareix en la *figura 5.12*. En la *figura 5.12* està encerclat de color blau el comandament per regular la velocitat de l'aire de l'interior del túnel i de color vermell l'indicador del nombre de voltes en que gira el ventilador (directament proporcional a la velocitat de l'aire del túnel).

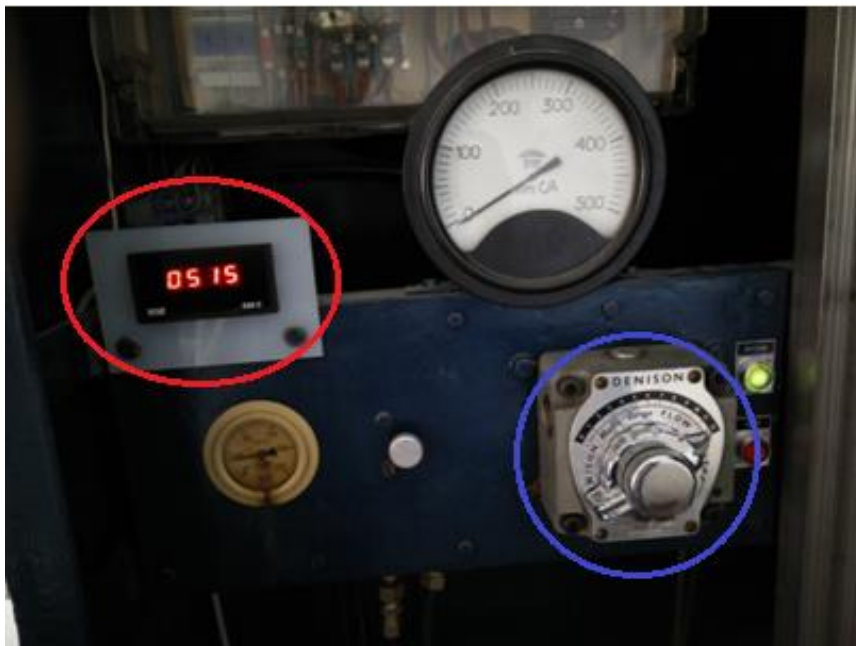


Figura 5.12. Comandament principal del túnel de vent. El regulador de velocitat està indicat en color blau i el comptador de nombre de voltes del ventilador en vermell. (Font: elaboració pròpia)

L'assaig s'ha dut a terme des de revolucions altes del ventilador fins a les més baixes.

Força de resistència a l'avanç

El valor de la força de resistència a l'avanç s'ha obtingut a partir dels sensors de la balança. Aquests sensors indiquen la força de resistència a l'avanç de l'objecte en unitats de **grams-força**. En l'aparell del túnel de vent indica aquesta força, però també es pot configurar per mesurar la força en les altres direccions o els moments, tal i com es veu en la *figura 5.13*.



Figura 5.13. Lectures de força de la balança. En aquesta imatge està configurat per mesurar la força en la direcció horitzontal. (Font: elaboració pròpia)

Velocitat de l'aire

Per altra banda per mesurar la velocitat de l'aire de l'interior del túnel s'ha utilitzat una **sonda de Prandtl** com l'indicat en la *figura 5.14* i un manòmetre diferencial com el de la *figura 5.15*.

Una sonda de Prandtl és la combinació d'un tub de Pitot que mesura la pressió total, i un tub piezomètric, que mesura la pressió estàtica. La sonda de Prandtl mesura la diferència de les dos, és a dir, la pressió dinàmica. Per mesurar correctament la pressió total, s'ha col·locat l'entrada del tub de Pitot al centre del túnel de vent i en direcció oposada a la direcció de l'aire tal i com s'observa en la *figura 5.14*.



Figura 5.14. Cambra d'assaig del túnel de vent amb la sonda de Prandtl encerclada de color vermell. (Font: elaboració pròpia)

Per poder veure aquesta pressió dinàmica i mesurar-la, la sonda de Prandtl s'ha connectat a un **manòmetre diferencial de tub inclinat**. Les unitats de l'escala de mesura de la sonda són **mil·límetres columna d'aigua**. El líquid indicador del manòmetre és un líquid derivat del petroli de densitat relativa equivalent a 0,88, que gràcies al tipus de manòmetre i la seva inclinació es pot llegir la pressió dinàmica en unitats de mm.c.a.

A partir d'aquesta taula d'equivalències es pot obtenir el seu valor en unitats de pressió de **metres columna d'aire**:

$$0,12 \text{ mbar} \cong 1,2 \text{ mmca} \cong 1 \text{ mcaire}$$

Per obtenir la velocitat de l'aire a partir de la pressió dinàmica, es pot deduir de l'equació següent de l'equació de Bernoulli i de l'equació fonamental de la hidrostàtica:

$$c = \sqrt{2gh} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (\text{Eq. 5.3})$$

On c és la velocitat de l'aire en metres per segon, g l'acceleració de la gravetat i h la pressió dinàmica en metres columna d'aire, ja que el fluid que circula pel túnel de vent és aire.



Figura 5.15. Manòmetre diferencial utilitzat en l'assaig experimental. (Font: elaboració pròpia)

Cal remarcar que degut a la presència del braç de balança els resultats poden sortir distorsionats i un cop recollides les mesures cal corregir l'equació F_D (*grams-força*)-pressió dinàmica (*mmca*).

Forma de les línies de corrent

A part de recollir aquestes mesures experimentals, s'ha observat el comportament de l'aire degut a la geometria del retrovisor amb fils enganxats a la carcassa d'aquest. Els fils blancs s'han repartit de manera equidistant per la carcassa. Quan el túnel de vent s'ha posat en marxa, s'ha il·luminat la zona de l'objecte per millorar la visualització del moviment d'aquests fils.

El moviment d'aquests fils correspon a **línies de corrent** de l'aire, que equivalen al moviment de les partícules. En altres túnels de vent s'aconsegueix veure aquestes línies de corrent amb fum o partícules de color. El resultat obtingut és el mateix que amb els fils sense haver d'enganxar res a l'objecte.

6. Resultats

6.1. Resultats de la simulació en CFX

La simulació 3D del flux al voltant del retrovisor amb la configuració prèvia (velocitat de l'aire= 80 km/h) ha durat 3 hores i 30 minuts. La simulació ha finalitzat en la iteració 109 degut al criteri de que els residus siguin menors que 10^{-5} . La forma d'aquests al llarg de la simulació ha estat la següent:

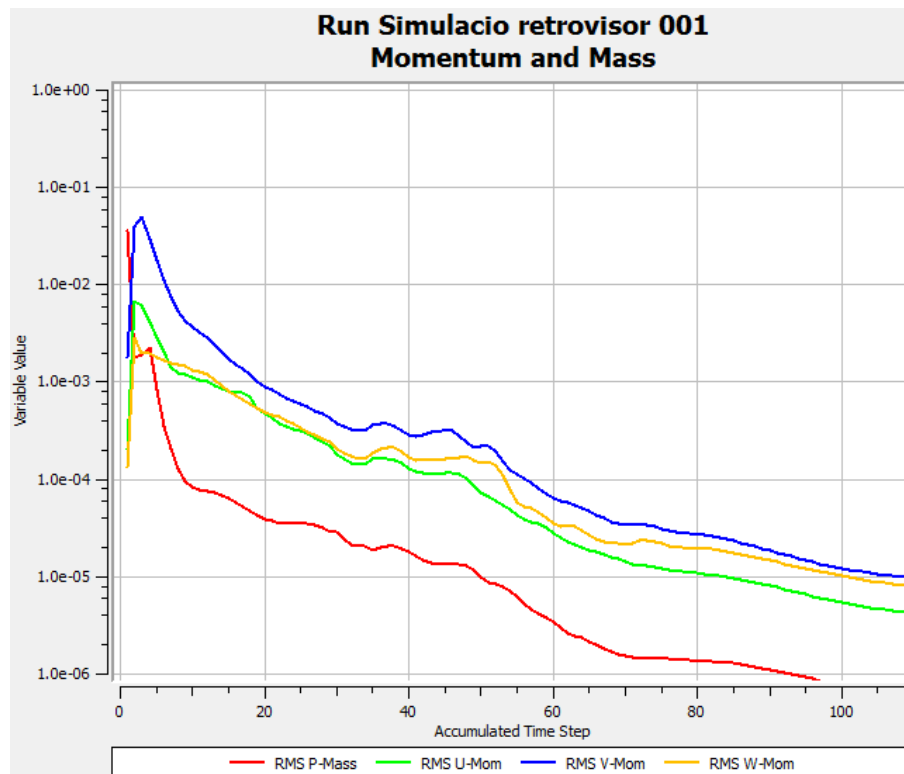


Figura 6.1. Residus de les equacions de moments i massa al llarg de la simulació. (Font: elaboració pròpia)

Es pot veure en la imatge com els residus van decreixent a mesura que es va iterant. Això indica que la simulació es produeix correctament i no cal arribar al màxim nombre d'iteracions. Pel que fa als residus de les equacions de turbulència al llarg de la simulació també tenen la mateixa forma.

Un cop acabada la simulació s'ha realitzat un anàlisi del comportament de l'aire al voltant del retrovisor on s'ha analitzat la **y+**, els coeficients **c_D** i **c_L**, la **distribució de pressions i velocitats** al voltant del retrovisor i les **línies de corrent** també al voltant d'aquest.

6.1.1. Y plus

Primer de tot s'ha analitzat la bondat de la malla. Tal i com s'ha exposat en l'*apartat 5.2.2*, la **y+** és un indicador de la bondat de la malla en la paret del retrovisor. Específicament, es considera una bona malla aquella que té com a valor màxim **y+=20**.

En el nostre cas, el valor màxim de **y+** és de *9,36 (figura 6.2)* i, per tant, podem considerar els resultats al voltant del retrovisor prou precisos.

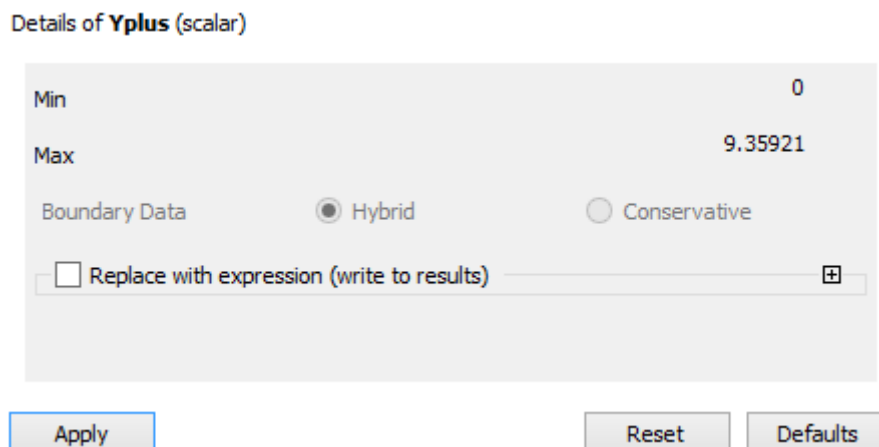


Figura 6.2. Valor màxim de la **y+** en l'anàlisi. (Font: elaboració pròpia)

Els valors més alts de la **y+** es troben on hi ha separació de capa límit per dues raons:

- S'ha imposat que l'alçada de la primera capa d'elements sigui igual en tota la paret.
- Aquesta zona és on les tensions de cisallament són més grans i la **y+** és proporcional a l'arrel quadrada d'aquestes tensions de cisallament.

La separació de la capa límit en el nostre retrovisor, que és el principal contribuent al c_D , es produeix en els canvis abruptes de geometria. En la *figura 6.3* s'ha representat el valor de la y^+ per cada punt de la paret del retrovisor. Els punts del centre de la carcassa i les parets laterals del retrovisor tenen una y^+ molt baixa perquè les tensions de cisallament són baixes, mentre que en les zones on el flux s'ha de desprendre de la geometria el valor de la y^+ és alt.

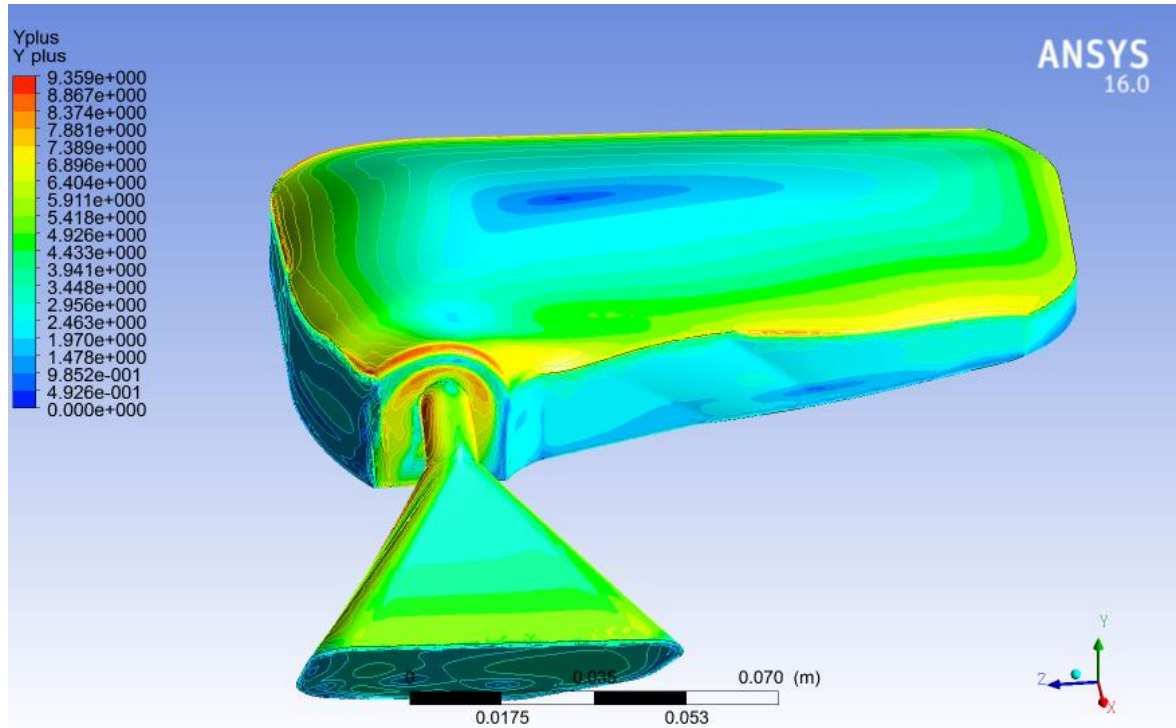


Figura 6.3. Representació del valor de la y^+ per tots els punts de la paret del retrovisor. (Font: elaboració pròpia)

6.1.2. Coeficient de resistència a l'avanç i coeficient de sustentació

Al principi de la simulació s'ha definit el c_D i el c_L com a punts de control. En el següent gràfic es mostra l'evolució d'aquests punts al llarg de les iteracions:

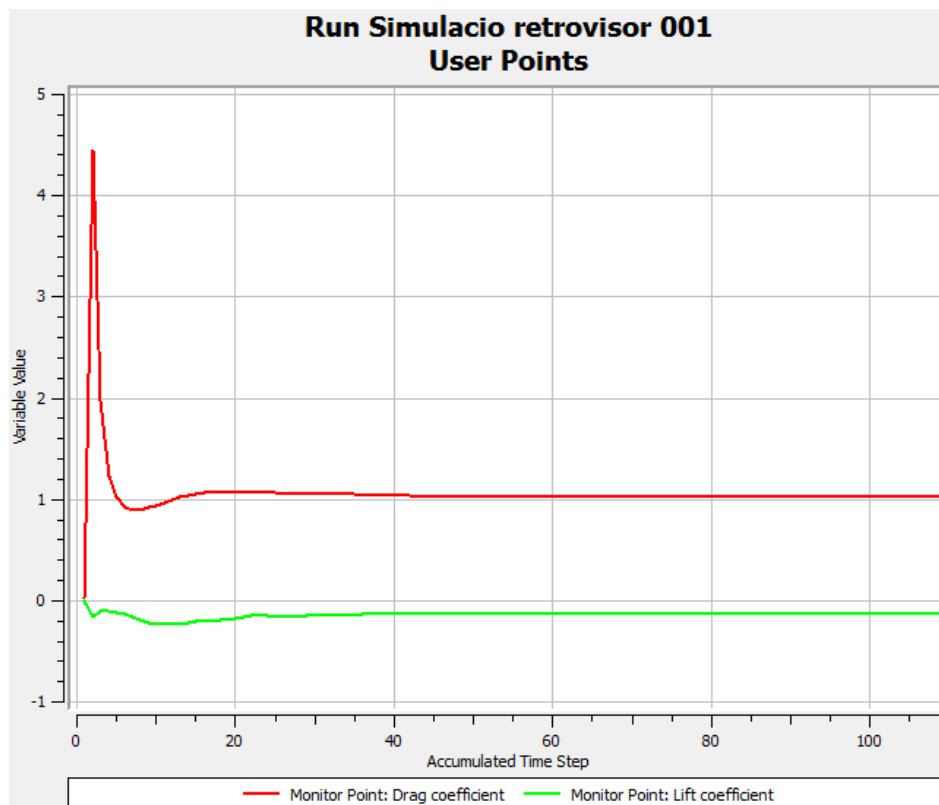


Figura 6.4. Punts de control al llarg de la simulació. (Font: elaboració pròpia)

Els punts de control s'estabilitzen aproximadament a partir de la iteració 40, per tant podem considerar els seus valors finals com a vàlids. Els valors finals del c_D i c_L són 1,0267 i -0,1264 respectivament.

El c_D és significatiu i indica que el retrovisor no està ben dissenyat, ja que el c_D és superior al adequat, que és un c_D al voltant de 0,5.

Per altra banda el c_L és molt petit i genera una força de sustentació negativa (en direcció al terra) de quasi zero. Aquesta força és negligible i per tant no es pot aprofitar per millorar l'adherència del vehicle.

Aquests resultats s'han obtingut amb una velocitat de l'aire de 80 km/h (que correspon a la velocitat experimental utilitzada en el túnel de vent). A més a més, s'han realitzat 4 simulacions més amb els mateixos paràmetres de simulació, però amb diferents velocitats de l'aire entre 67,5 km/h i 120 km/h, i una simulació extra amb una velocitat de 200 km/h.

Els resultats que estan recollits en el *punt 1 de l'annex* mostren que per els diferents valors de velocitats dins del rang 67,5-120 km/h el c_D és **constant i igual a 1,03**. Això concorda amb la teoria que diu que el c_D no varia segons el Reynolds (és a dir, segons la velocitat) quan existeix capa límit laminar. En canvi, el resultat del c_D de la simulació amb velocitat de l'aire de 200 km/h és més baix ($c_D=0,96$), ja que el número de Reynolds és bastant elevat ($Re=1,4 \cdot 10^5$) i la capa límit ja comença a ser turbulenta.

6.1.3. Distribució de pressions

Per estudiar la distribució de pressions s'ha analitzat el pla mig del retrovisor.

La pressió màxima, de 295 Pa i de color vermell en la *figura 6.5*, es produeix en la part davantera del retrovisor. Això és degut a que l'aire impacta en el retrovisor i la velocitat en aquesta zona és mínima. El **principi de Bernoulli** implica que a menor velocitat del fluid (no viscos) la pressió d'aquest augmenta, ja que la seva energia és manté constant.

En la part posterior del retrovisor hi ha una zona de pressions negatives (representat en color blau en la *figura 6.5*). Aquesta zona correspon a la zona de turbulència creada per la separació de capa límit, on apareixen remolins aleatoris.

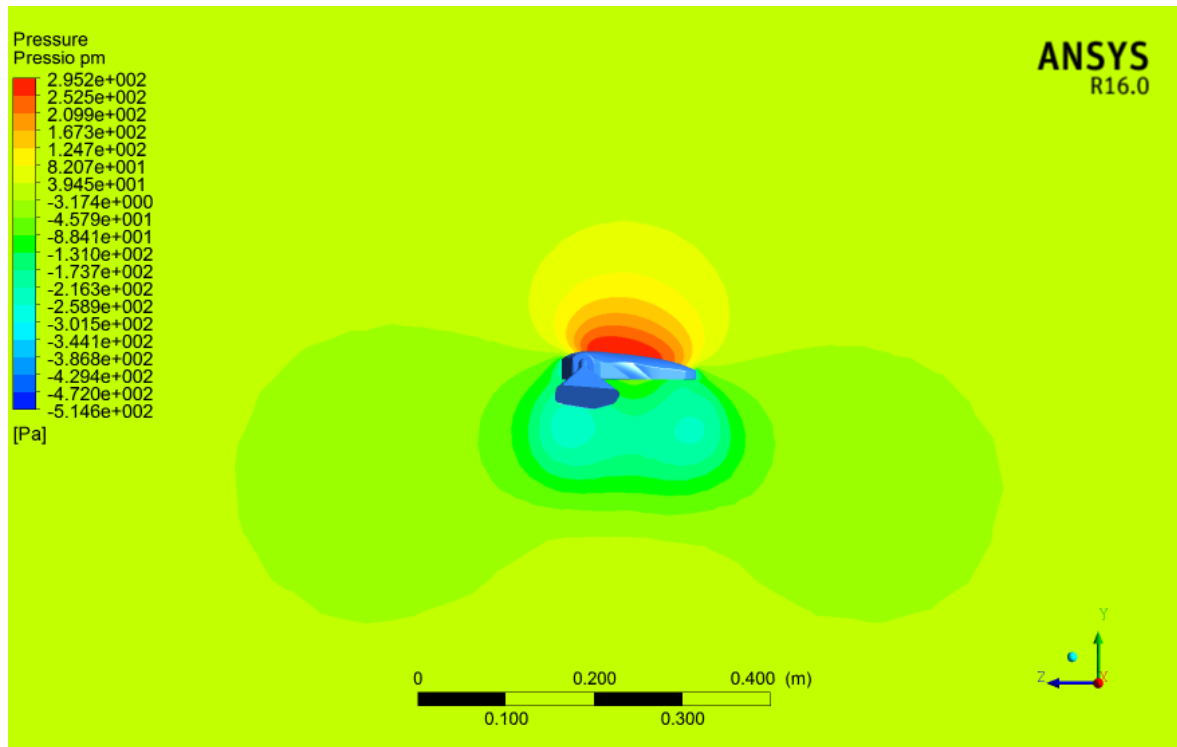


Figura 6.5. Distribució de pressions de l'aire per una velocitat de 80 km/h a l'entrada. (Font: elaboració pròpia)

Si s'analitza la distribució de pressions en un pla perpendicular a l'eix Z enlloc de l'eix X s'observa la mateixa configuració de pressions, tal i com es mostra en la *figura 6.6*.

En la part frontal del retrovisor es troba la zona d'altres pressions i en la part posterior les baixes. A més a més, tot i que hi ha una zona intensa de vòrtexs just darrere del retrovisor es pot comprovar com aquest efecte encara persisteix mig metre més enllà tot i que sigui amb un menor efecte.

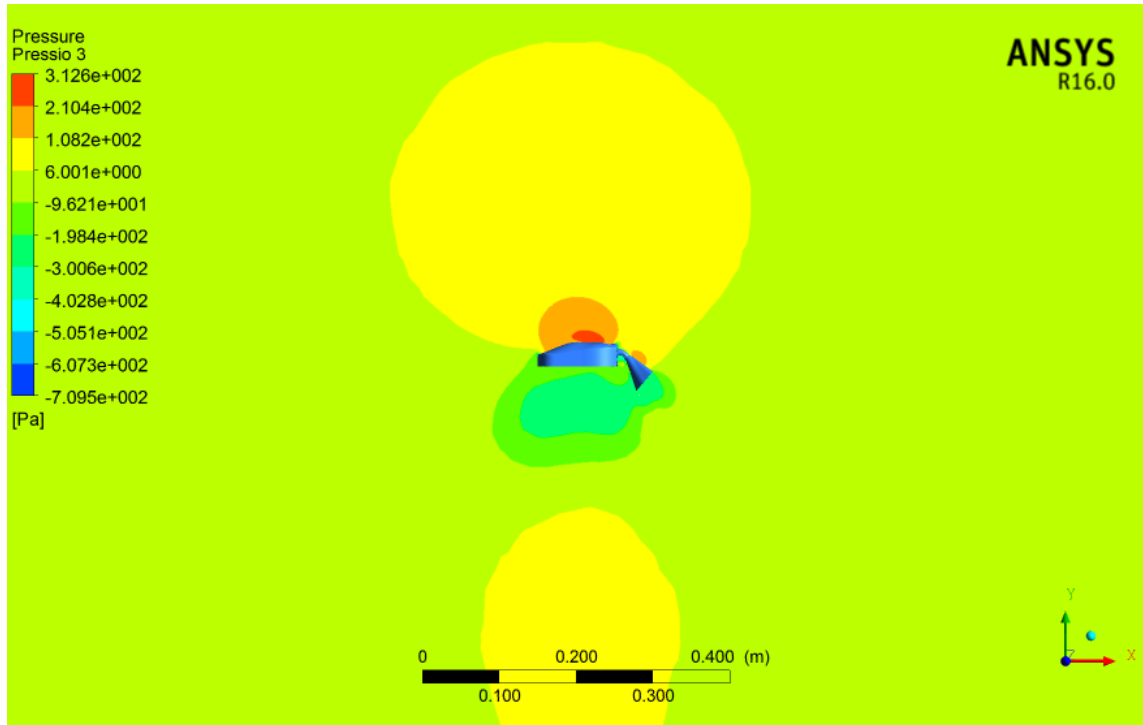


Figura 6.6. Distribució de pressions en un pla perpendicular a l'eix z. (Font: elaboració pròpia)

6.1.4. Distribució de velocitats

Per analitzar la distribució de velocitats de l'aire al voltant del retrovisor també s'han utilitzat els dos plans de l'apartat anterior.

En la *figura 6.7* hi ha representada la direcció i el valor de la velocitat de diferents partícules de l'aire, en blau els valors més baixos i en vermell els més alts. Tal i com es podria deduir de l'equació de Bernoulli en la part frontal del retrovisor està situada la zona de velocitats baixes.

Quan la superfície del retrovisor canvia de pendent bruscament és quan el flux d'aire no pot seguir enganxat a la geometria i es separa la capa límit. Es pot veure en la figura com es creen dos grans remolins darrere el retrovisor degut a aquesta separació. Es una zona de velocitats baixes i aleatòries. Com que la zona de turbulència darrere el retrovisor és gran, això causa que el c_D del retrovisor també sigui gran.

En la zona allunyada de la geometria la velocitat de l'aire és la d'entrada, 80 km/h (22,2 m/s).

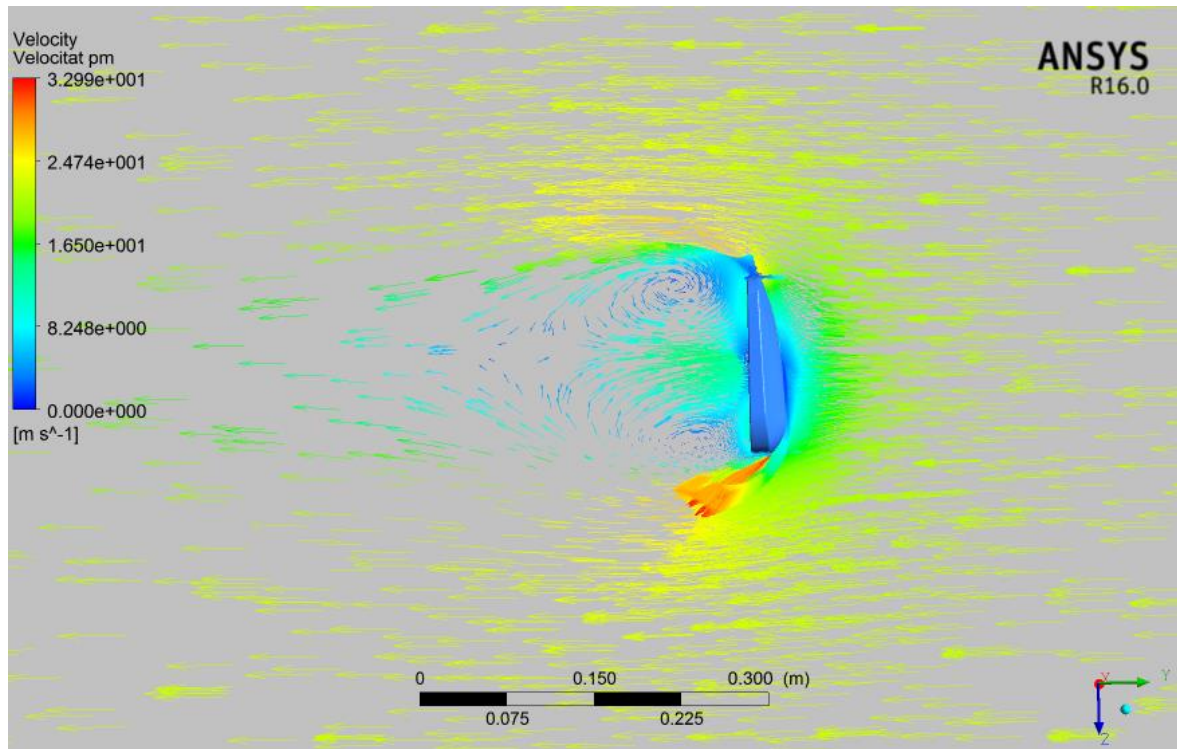


Figura 6.7. Representació dels vectors de velocitat en el pla mig del retrovisor. (Font: elaboració pròpia)

6.1.5. Línies de corrent

Si s'analitza les línies de corrent també s'observa el mateix efecte. En la *figura 6.8* hi ha representades les línies de corrent que surten del retrovisor (per una visualització més senzilla i clara).

Les línies de corrent que surten de la superfície davantera del retrovisor es separen de la geometria creant en la part posterior un volum de remolins i vòrtexs. Un cop s'acaba aquesta zona de turbulències les línies de corrent es tornen a alinear a la direcció inicial de la velocitat i es recupera la magnitud de *80 km/h* de la velocitat de l'aire.

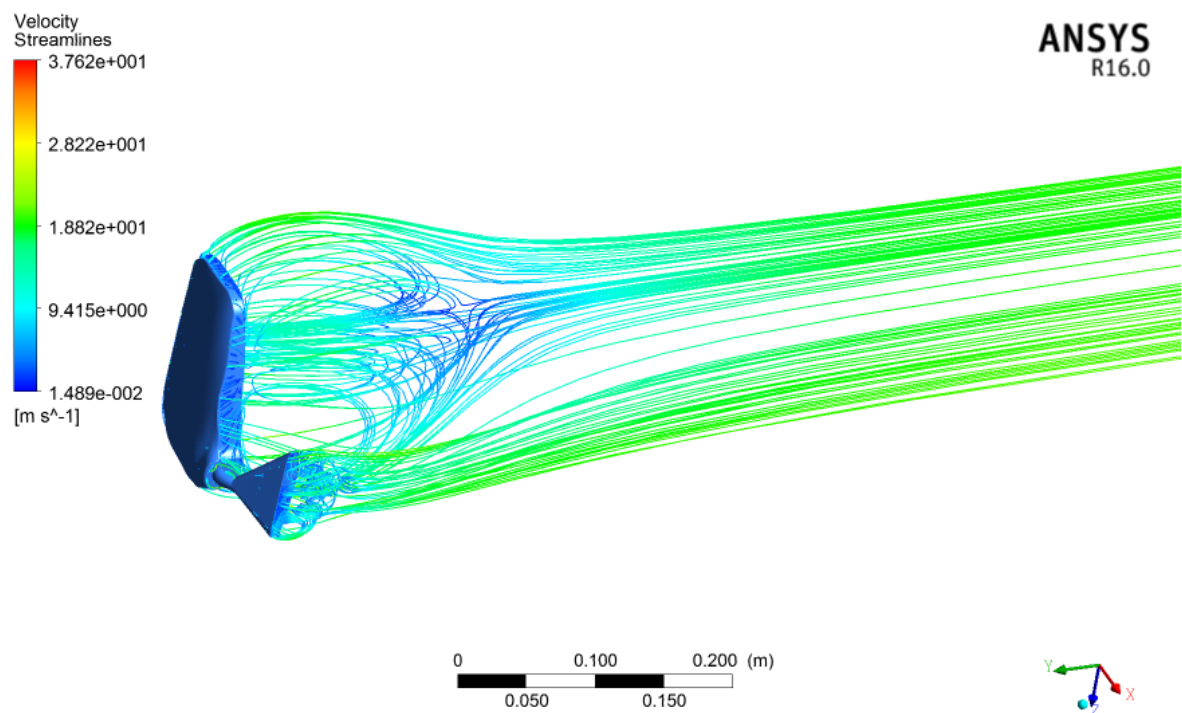


Figura 6.8. Representació de les línies de corrent que comencen des de la superfície del retrovisor. (Font: elaboració pròpia)

6.2. Resultats experimentals del túnel de vent

6.2.1. Dades experimentals

En l'assaig experimental s'ha estudiat el retrovisor en escala 1:1. Per tant, no cal incrementar ni reduir la velocitat de l'aire perquè correspongui amb la real per l'efecte de l'escala.

Es va mesurar la pressió amb la sonda de Prandtl i els grams força amb els propis indicadors del túnel de vent de 7 instants diferents. **Només** es van poder realitzar 7 lectures de velocitats de l'aire elevades a de més petites perquè quan s'estava duent a terme el procés a la inversa es va espatllar el túnel. Conseqüentment l'assaig es va haver d'aturar i no es van poder obtenir més mesures de l'experiment.

Aquestes mesures, després d'aplicar la correcció pel braç balança, són:

# mesura	Kilopondis	mmca
1	0,530	34
2	0,494	30
3	0,375	24
4	0,240	15,5
5	0,210	13
6	0,173	11
7	0,150	9,5

Taula 6.1. Mesures experimentals.

A partir d'aquestes dades es pot obtenir el C_D en funció del número de Reynolds i la força d'arrossegament en funció de la velocitat.

Per poder realitzar aquests càlculs necessitem definir prèviament el valor de la viscositat dinàmica del fluid, la densitat del fluid i l'àrea projectada del retrovisor. Tenint en compte que el fluid utilitzat pel túnel de vent és l'aire i la temperatura del laboratori era 25°C en el moment de l'assaig els valors corresponen a:

Viscositat dinàmica: $\mu = 1,825 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$ [15]

Densitat de l'aire: $\rho = 1,19 \frac{kg}{m^3}$ [15]

L'àrea projectada del retrovisor (l'àrea d'arrossegament) és de $14846,18 mm^2$.

6.2.2. Força d'arrossegament en funció de la velocitat del fluid

La **velocitat del fluid** es pot calcular a partir dels valors de la sonda de Prandtl utilitzant l'equació 5.3 i la resistència a l'avanç (F_D) els valors de gram força del túnel de vent. Utilitzant la segona llei de Newton per transformar els Kilopondis en F_D i tenint en compte que

$1,2 mmca = 1 mcaire$ s'obté:

# mesura	mmca	mcaire	v (m/s)	Kilopondis	Fd (N)
1	34	28,33	23,57	0,530	5,19
2	30	25,00	22,14	0,494	4,84
3	24	20,00	19,80	0,375	3,67
4	15,5	12,91	15,91	0,240	2,35
5	13	10,83	14,57	0,210	2,06
6	11	9,16	13,41	0,173	1,69
7	9,5	7,91	12,46	0,150	1,47

Taula 6.2. Valors de velocitat i força d'arrossegament.

La figura 6.9 representa la **força de resistència a l'avanç** que rep el retrovisor segons quina sigui la velocitat del fluid, en el nostre cas aire a 25 °C. Per exemple, quan l'automòbil circuli a $19,8 m/s$ un retrovisor rebrà $3,68 N$ de força en direcció oposada a l'avanç. L'assaig en el túnel de vent s'ha dut a terme amb velocitats de l'aire entre $12,5 m/s$ i $23,5 m/s$, però amb una corba de regressió es pot extrapolar per velocitats de fora d'aquest rang de valors (sempre en la zona de c_D constant).

Els punts **resistència a l'avanç - velocitat** s'ajusten a una corba polinòmica de grau 2, representada en color negre sobre els punts experimentals. Lògicament és així ja que la F_D és directament proporcional a la velocitat del fluid al quadrat (*equació 4.3*).

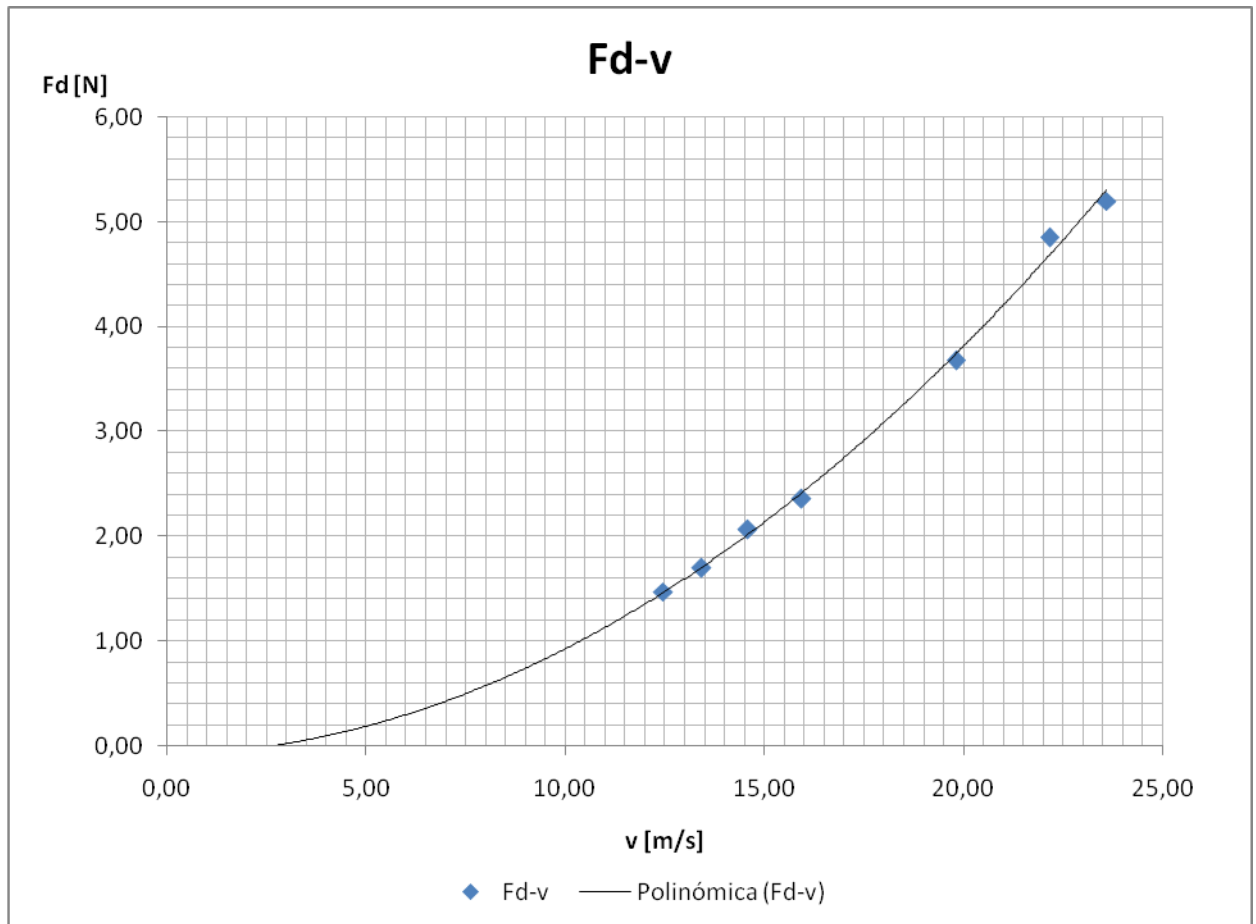


Figura 6.9. Representació de la resistència a l'avanç en funció de la velocitat. En negra la corba polinòmica de grau 2 de regressió. (Font: elaboració pròpia)

La **corba d'ajust** és:

$$F_D = 0,0095V^2 \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Aquesta corba té una variància residual de $Sr = 0,0480$ i un coeficient de determinació de

$R^2 = 0,9981$ (corregit $\bar{R}^2 = 0,9977$). Això significa que els punts s'ajusten bastant bé al model (el 99,77% de la incertesa original s'ha explicat amb el model).

Lavors amb aquest model podem extrapolar quina força de resistència a l'avanç rebria el retrovisor per velocitats de l'aire reals. Per exemple, si l'automòbil circula a 100 km/h la força

de resistència a l'avanç és de $F_D = 0,0095 * (100 \frac{km}{h} * 1000 \frac{m}{km} * \frac{1}{3600} \frac{h}{s})^2 = 7,33 N$.

6.2.3. Coeficient de resistència a l'avanç en funció del número de Reynolds

Amb les dades de la *taula 6.2* obtingudes a l'apartat anterior es pot calcular i representar el coeficient de resistència a l'avanç en funció del número de Reynolds.

S'ha aplicat l'*equació 4.3* per calcular el c_D . Per calcular el número de Reynolds en cada punt s'ha utilitzat la fórmula del número de Reynolds (*equació 6.2*), on la longitud característica és l'arrel quadrada de l'àrea projectada:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot \sqrt{A_D}}{\mu} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Els resultats són els de la *taula 6.3* i estan representats en la *figura 6.10*. Es pot observar com el c_D és quasi constant per tot el rang de valors del número de Reynolds del gràfic. Això és coherent amb el comportament teòric, ja que com s'ha explicat en la secció 4.4, el c_D és aproximadament constant entre $Re = 10^4$ i $Re = 5 \cdot 10^5$. Després d'aquests valors de Reynolds hi hauria un punt on el c_D començaria a disminuir al augmentar el número de Reynolds.

Cd	Re
1,072	99018
1,068	106548
1,097	115830
1,052	126478
1,061	157382
1,118	175959
1,059	187322

Taula 6.3. Punts del coeficient de resistència a l'avanç en funció del número de Reynolds obtinguts en el túnel de vent.

En negre hi ha representada la recta de regressió que s'ajusta als punts experimentals. Aquesta recta és:

$$c_D = 1,062 + (9,6 \cdot 10^{-8})Re \quad (\text{Eq. 6.3})$$

El terme depenent del nombre de Reynolds és molt petit en aquest rang de valors per Re . Per tant es pot aproximar el c_D com a constant, ja que aquest no hauria de variar. Llavors es pot considerar el c_D com el valor de c_D amb més aparicions i obtindrem:

$$c_D = 1,06 \quad (\text{Eq. 6.4})$$

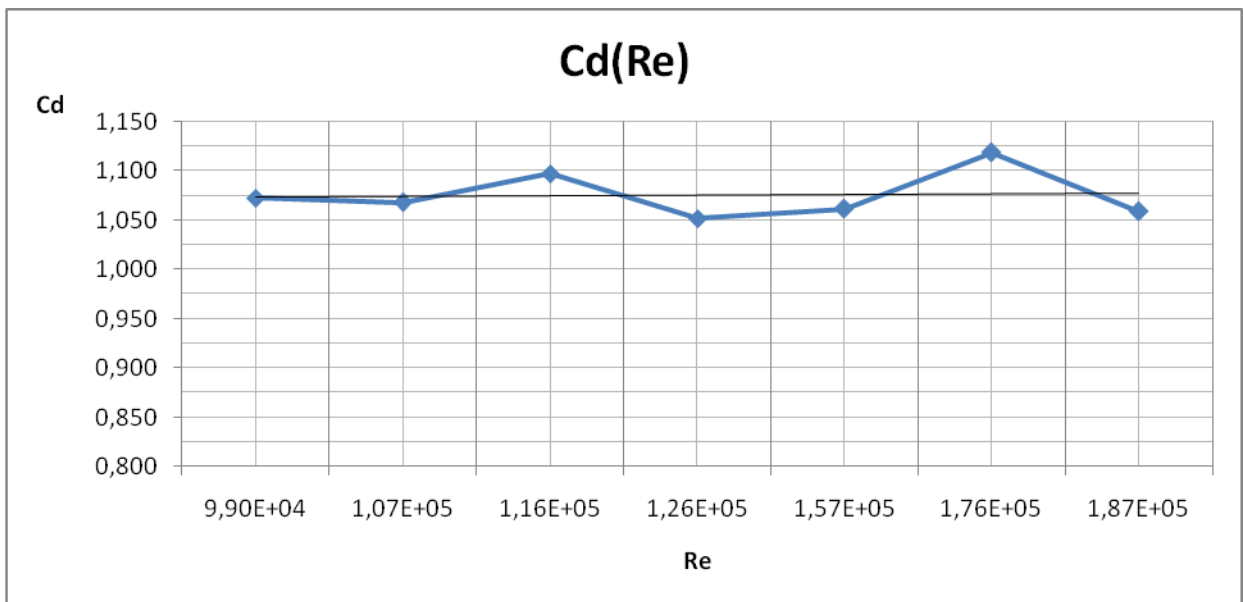


Figura 6.10. Coeficient de resistència a l'avanç en funció del número de Reynolds amb les dades obtingudes de l'experimentació amb el túnel de vent. (Font: elaboració pròpia)

Si agafem com a recta d'ajust l'equació 6.4 la variància residual és de $S_r = 0,005$ amb un coeficient de variació del 7%.

Aquest valor de c_D és bastant alt comparat amb el valor de c_D ideal per un retrovisor que proposa Wolf-Heinrich Hucho de **0,5** [2]. Això significa que el disseny aerodinàmic del retrovisor és millorable i pot ser degut a que és un disseny antic de retrovisor.

6.2.4. Línies de corrent al voltant del retrovisor

Durant l'assaig també s'ha estudiat la forma de les línies de corrent al voltant del retrovisor.

Per poder visualitzar aquestes línies de corrent durant l'assaig es van col·locar fils blancs enganxats per un extrem a la carcassa del retrovisor, tal com es mostra en les *figures 6.11 i 6.12*.



Figura 6.11. Retrovisor dins el túnel de vent, on es veuen els fils utilitzats per observar les línies de corrent (vista posterior). (Font: elaboració pròpia)



Figura 6.12. Retrovisor dins el túnel de vent, on es veuen els fils utilitzats per observar les línies de corrent (vista frontal). (Font: elaboració pròpia)

Es pot dividir el comportament de les línies de corrent (fils) durant l'assaig en dos de ben diferents segons la zona en que estan col·locats:

- **Carcassa del retrovisor:** Les línies de corrent situades sobre la carcassa segueixen la geometria de la superfície del retrovisor. Si ens fixem en els dos fils col·locats sobre la carcassa de la *figura 6.13*, es pot comprovar com la velocitat de les partícules d'aire en la part superior del retrovisor es tangent a la superfície fins arribar a l'extrem.

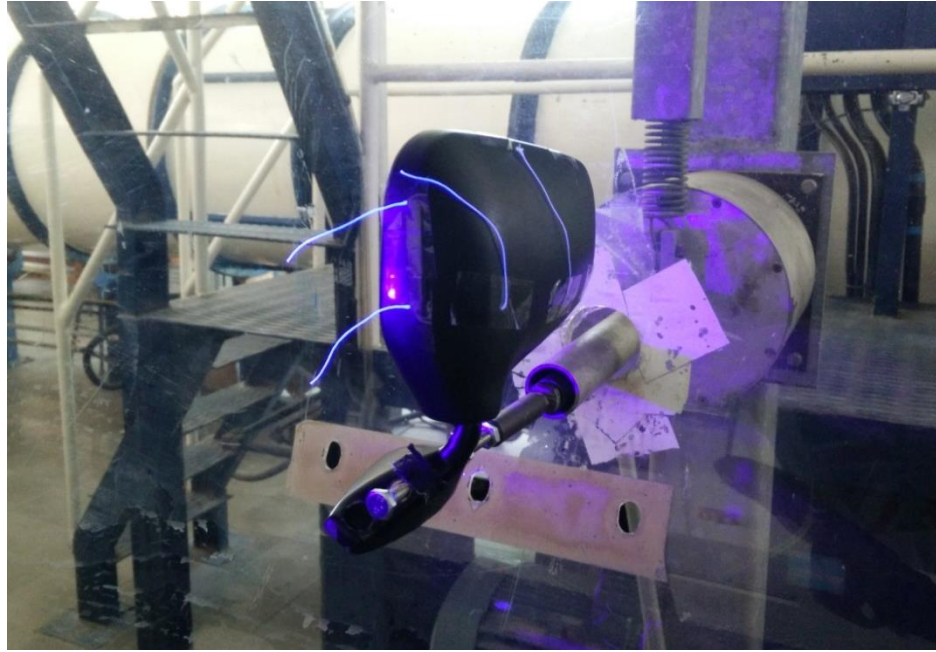


Figura 6.13. Assaig del retrovisor en el túnel de vent. En aquest instant el fluid té una velocitat de $14,6 \text{ m/s}$. (Font: elaboració pròpia)

- **Laterals del retrovisor:** aquests fils són els que estan situats a la vora del mirall del retrovisor, i són els que són afectats per la separació de la capa límit i l'estela conseqüent. La *figura 6.14* són fotografies del retrovisor durant l'assaig quan la velocitat de l'aire era de $14,6 \text{ m/s}$. Es pot veure com la forma dels fils no correspon a cap perfil en concret.



Figura 6.14. Dues fotografies del retrovisor durant l'assaig del túnel de vent fetes amb dos angles diferents. (Font: elaboració pròpia)

La posició dels fils varia ràpidament i aleatòriament a causa dels vòrtexs que es creen en la part posterior del retrovisor per la separació de la capa límit. Com que hi ha un canvi de geometria abrupte (la vora del retrovisor), la capa límit es separa i això dona lloc a una zona de remolins. L'existència d'aquests remolins es pot comprovar veient com els fils són atrets i escopits de la part posterior del retrovisor. En la *figura 6.15* es mostra la seqüència de la posició dels fils al llarg d'un petit lapse de temps.

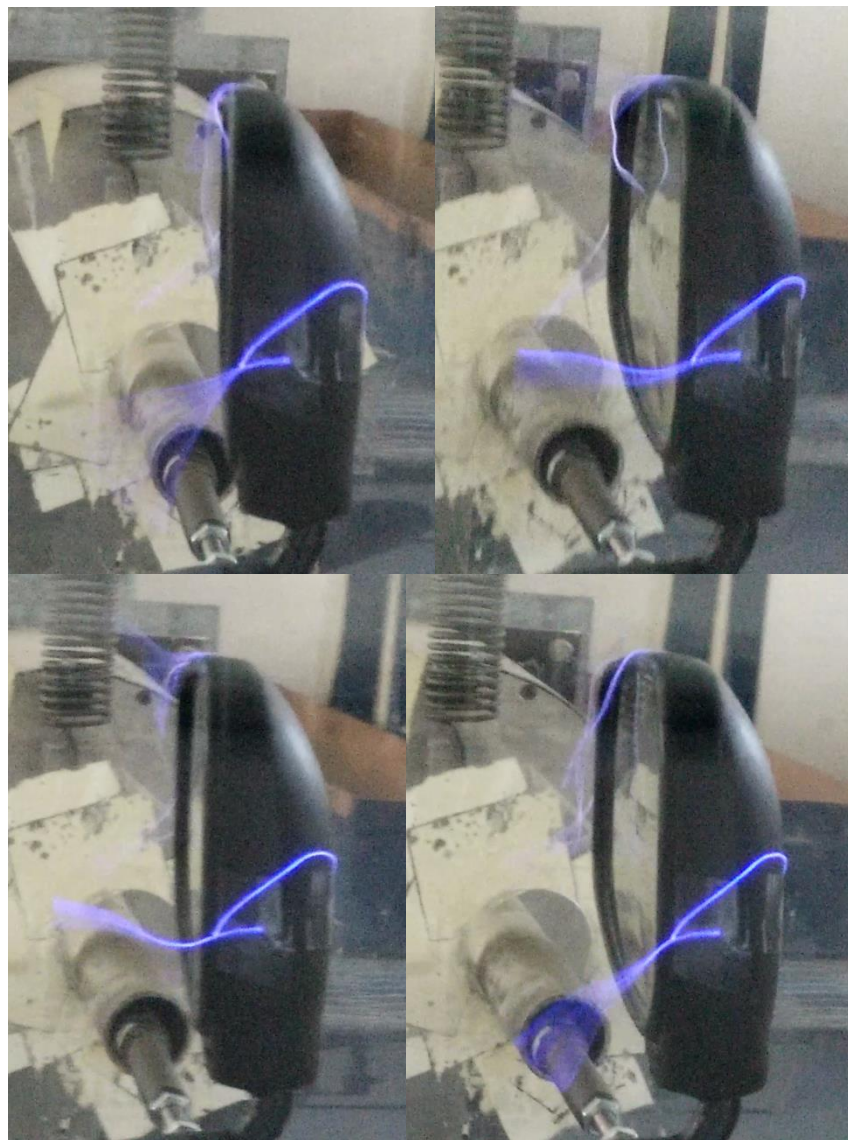


Figura 6.15. Seqüència del retrovisor durant l'assaig del túnel de vent amb $v=14,6$ m/s. (Font: elaboració pròpia)

7. Comparació dels resultats

Els resultats obtinguts amb els dos mètodes d'anàlisi són lleugerament diferents. L'objectiu d'aquest apartat de la memòria es comparar els valors experimentals de c_D i c_L amb els de la simulació amb CFX per determinar quins valors són els més adients per assignar al retrovisor. També es compara la forma de les línies de corrent dels dos anàlisis.

7.1. Coeficient de resistència a l'avanç i coeficient de sustentació

Tal i com s'exposa en els apartats anteriors, els valors de c_D i c_L obtinguts en la simulació en CFX i l'experimentació en túnel de vent són els de la *taula 7.1*.

	CFX	Túnel de vent
c_D	1,03	1,06
c_L	-0,13	-

Taula 7.1. Valors de c_D i c_L obtinguts en els anàlisis.

No existeix valor del coeficient de sustentació per l'experimentació del túnel de vent, ja que no s'ha mesurat perquè aquest valor és negligible en quant a l'influència aerodinàmica del retrovisor al vehicle.

Pel que fa el c_D , si es compara els valors dels dos anàlisis existeix un **error del 3%** del valor de c_D del CFX respecte el c_D del túnel de vent:

$$error [\%] = 100 * \frac{c_{D,TV} - c_{D,CFX}}{c_{D,CFX}} = 2,91\%$$

Aquest error és suficientment bo, és a dir, petit en el nostre cas i es podria fer més simulacions amb aquest model. Com que els resultats de la simulació en CFX es poden considerar com a vàlids, en la proposta de retrovisor del següent apartat en la que es vol millorar el c_D es simularà en CFX sense crear el prototip i realitzar l'assaig en el túnel de vent. Això permet reduir en gran mesura els costos del procés de millora del retrovisor.

En altres anàlisis aquest valor d'error pot ser significant i conseqüentment no es podria donar com a correctes els resultats de la simulació en CFX. Per exemple, un error del 3% en la simulació d'un aleró d'un Fórmula 1 pot afectar considerablement el rendiment del vehicle i, per tant, per decidir si es construeix el vehicle amb aquest aleró aquests resultats no serien vàlids.

Com que en el nostre cas tenim els resultats del túnel de vent i la simulació numèrica, donarem com a valor definitiu de c_D el del túnel de vent perquè la fiabilitat d'aquest mètode d'anàlisi és més gran (*explicat en la secció 5.1*). Per tant:

$$c_{D,retrovisor} = 1,06$$

7.2. Línies de corrent

Les línies de corrent s'han representat amb els dos anàlisis, en les representacions del vector velocitat amb CFX i amb els fils enganxats en el retrovisor en l'experiment.

Si s'observa el retrovisor des de el seu lateral es veu com els fils de la vora del retrovisor formen els remolins que apareixen en l'anàlisi en CFX. En resum, en la *figura 7.1* es mostra com coincideixen els resultats dels dos anàlisis.

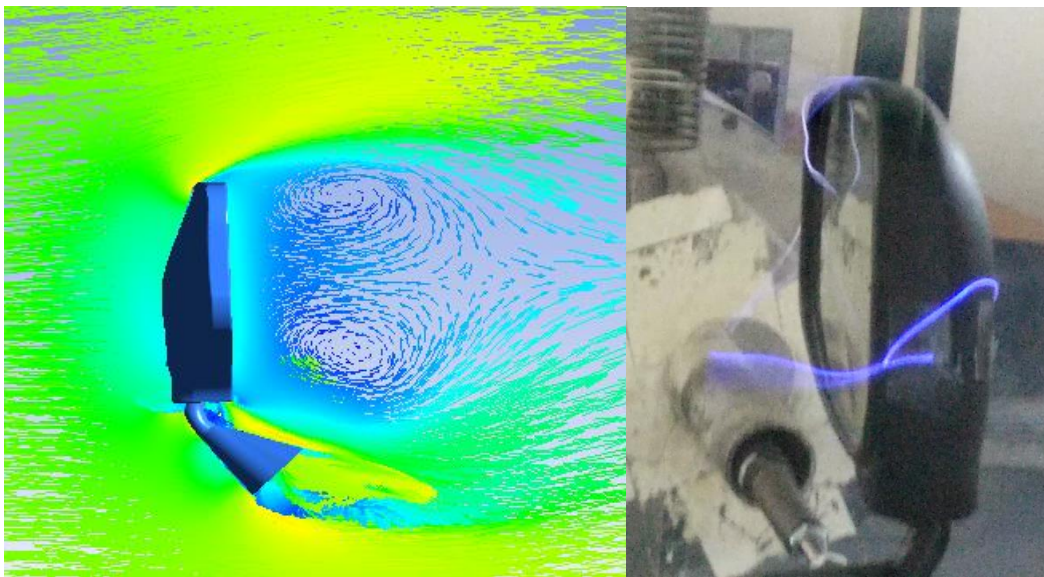


Figura 7.1. Representació dels vectors velocitats amb CFX (esquerra) i imatge del retrovisor en l'assaig del túnel de vent (dreta). (Font: elaboració pròpia)

8. Millora del disseny del retrovisor

En els apartats anteriors s'ha determinat que el coeficient de resistència a l'avanç del retrovisor que hem analitzat és de 1,06, molt superior al valor òptim que proposa Heinrich Hucho [2].

L'objectiu d'aquest apartat és proposar una millora en el disseny per acostar el valor de c_D a 0,5. Com que no entra dins de l'abast d'aquest treball el càlcul de la mida del mirall necessària per una bona visió del conductor, es millorarà el disseny de la carcassa del retrovisor sense canviar la mida del mirall.

8.1. Variació del c_D segons la geometria

El c_D depèn directament de la geometria, és a dir, aquest coeficient serà més baix si el flux té més facilitat en travessar l'objecte. En la *figura 8.1* apareix el valor del c_D per diferents geometries. La geometria amb menys c_D són els cossos aerodinàmics (*streamlined bodies*) i les geometries amb més c_D són les plaques perpendiculars a la direcció del flux. En aquestes últimes es produeix separació de la capa límit en els extrems i es crea una estela molt gran, a diferència dels cossos aerodinàmics que l'estela pot arribar a ser molt petita.

Veient aquesta relació es pot suposar que el c_D del retrovisor analitzat és alt perquè la forma de la seva carcassa és **força plana i poc aerodinàmica**. En futures propostes, si es vol millorar el c_D , s'hauria d'arrodonir la seva superfície. Així es passaria d'un coeficient de magnitud com la d'un quadrat/rectangle a la d'una semiesfera, que està al voltant del 0,5.


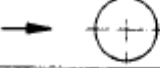

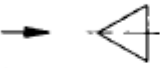
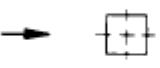
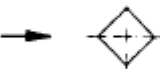
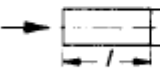
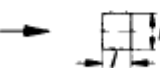
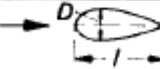

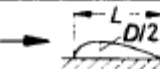
Body	Flow situation	$C_{D,c}$
Circular plate		1.17
Sphere		0.47*
Half-sphere		0.42*
60°-cone		0.50
Cube		1.05*
Cube		0.80*
Circular cylinder $l/D > 2$		0.82
Circular cylinder $l/D > 1$		1.15
Streamlined body $l/D = 2,5$		0.04
Circular half-plate at a ground plane		1.19
Streamlined half-body at a ground plane		0.09

Figura 8.1. C_D per diferents geometries. [2]

8.2. Propostes de millora

S'han realitzat **dos propostes** de millora de la geometria. Les dos propostes han consistit en arrodonir la carcassa sense canviar la mida del mirall ni la forma del suport. Tot i que la forma del suport també contribueix al C_D , és la carcassa del retrovisor qui influeix més.

En la primera proposta s'ha arrodonit la carcassa de manera que el punt més alt del retrovisor s'ha incrementat un 15%. En la segona, s'ha arrodonit encara més elevat el punt més alt un 70%.

En la *figura 8.2* hi ha la representació d'algunes de les corbes de la superfície de la carcassa. La primera proposta és molt semblant al disseny original. En canvi, en la segona la geometria es vol aproximar la forma de la superfície a una semiesfera.

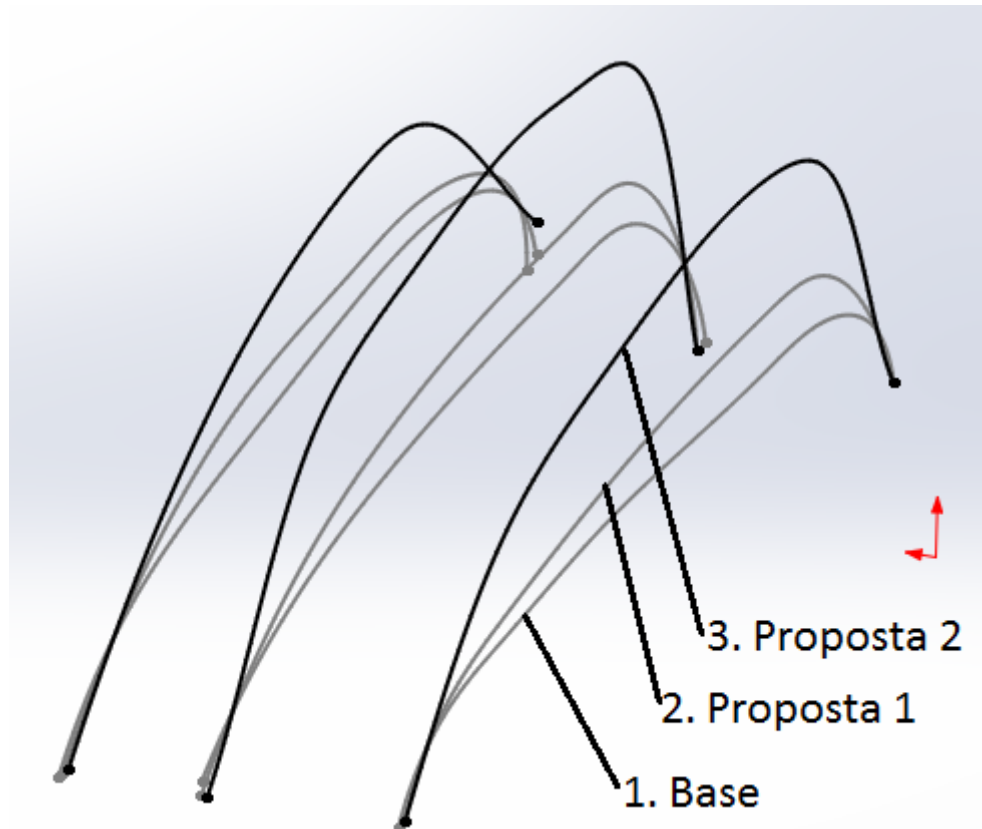


Figura 8.2. Corbes de superfície de la carcassa del retrovisor i de les propostes de millora.
(Font: elaboració pròpia)

Les dos propostes i el disseny base representades en 3D són les següents:

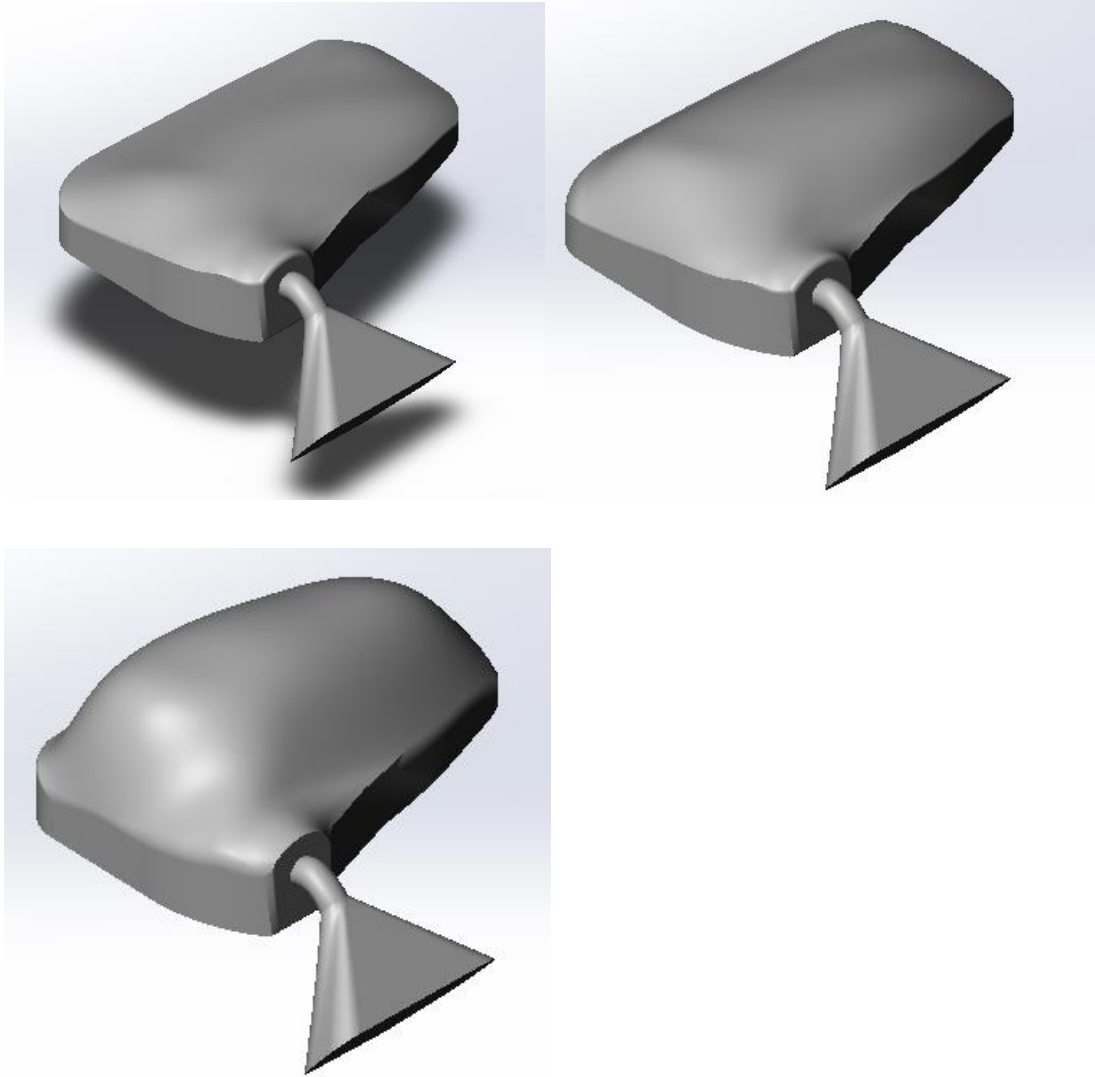


Figura 8.3. Retrovisor analitzat (dalt esquerra), primera proposta de disseny (dalt dreta) i segona proposta de disseny (sota). (Font: elaboració pròpia)

8.3. Coeficients de resistència a l'avanç de les propostes de disseny

S'han analitzat els nous dissenys en CFX amb la mateixa configuració de malla i simulació que el disseny base. Com que ni la forma del suport ni la mida del mirall han canviat, l'àrea projectada pel càlcul del c_D també és la mateixa.

Els resultats són els següents:

Disseny	C_D
Base	1,03
Proposta 1	0,85
Proposta 2	0,64

Taula 8.1. Resultats de c_D de les propostes de disseny.

Clarament el millor disseny és la **proposta 2**. El valor del c_D s'aproxima a 0,5, mentre que el de la segona proposta encara està força lluny del valor òptim.

En l'anàlisi de la separació de la capa límit de la *figura 8.4* es veu com l'estela creada a la part posterior del retrovisor és més petita que en el disseny base i més petita que en la proposta 1 (*figura 8.5*). Es pot comprovar que el flux roman enganxat a la superfície i no es separa tan aviat com en el cas base.

Això es confirma en l'anàlisi de la distribució de pressions de les dos propostes. En la segona proposta (*figura 8.7*) l'estela creada en la part posterior del retrovisor és més petita que en la primera (*figura 8.8*). També la pressió negativa d'aquesta zona és més gran en valors absoluts en la primera proposta. La pressió màxima negativa és -477 Pa en la primera proposta i -458 Pa en la segona.

Nota: les figures de les distribucions de velocitats i pressions es poden trobar en els apartats de la memòria 6.1.4 i 6.1.3 respectivament.

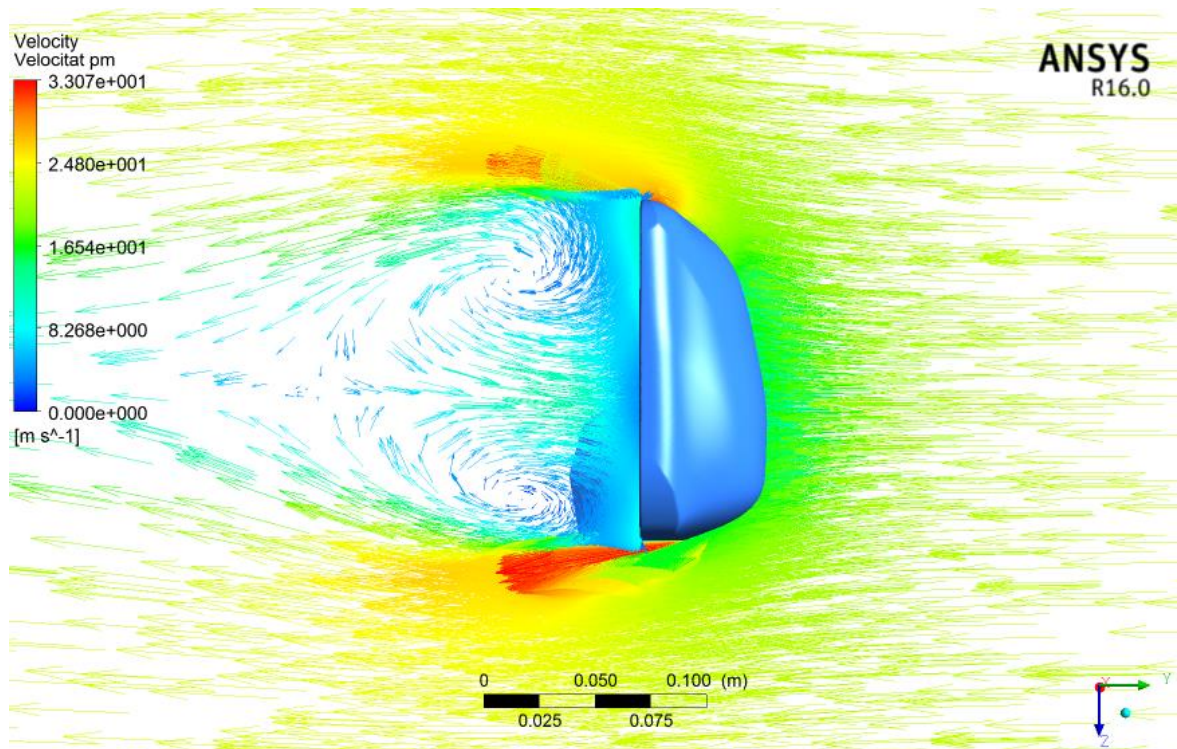


Figura 8.4. Representació dels vectors velocitat de la segona proposta de disseny. (Font: elaboració pròpia)

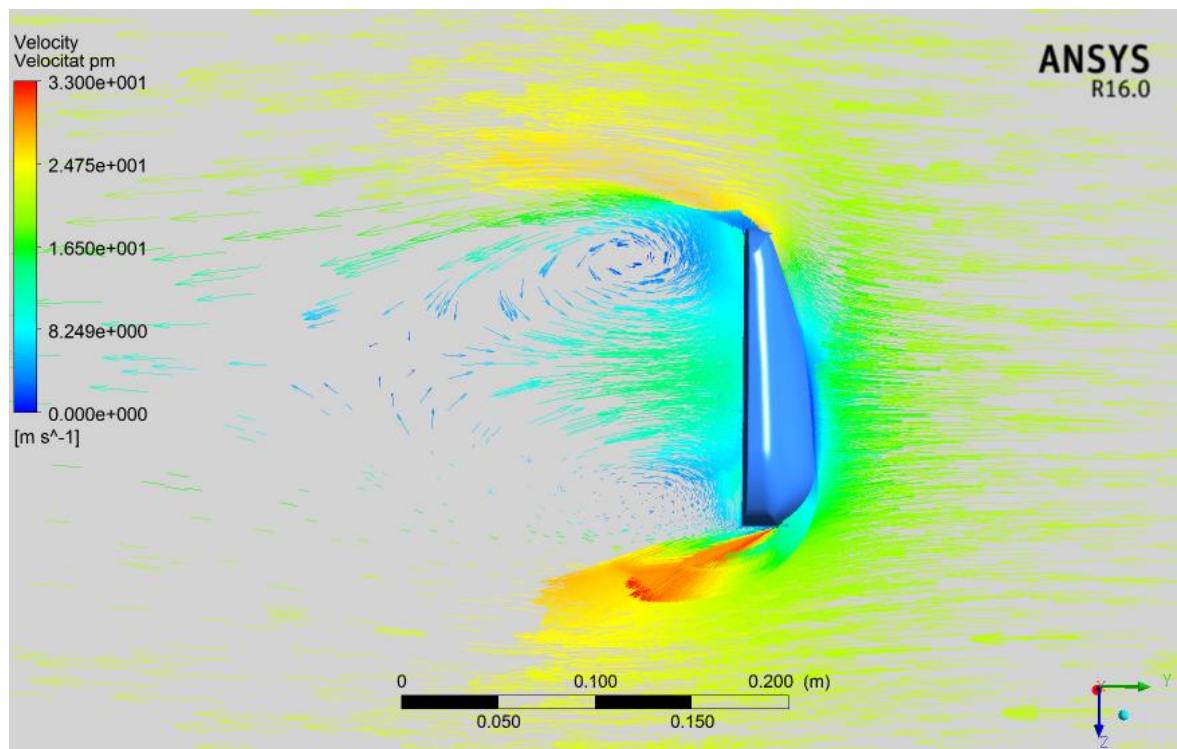


Figura 8.5. Representació dels vectors de velocitat en l'anàlisi en CFX de la primera proposta de disseny. (Font: elaboració pròpia)

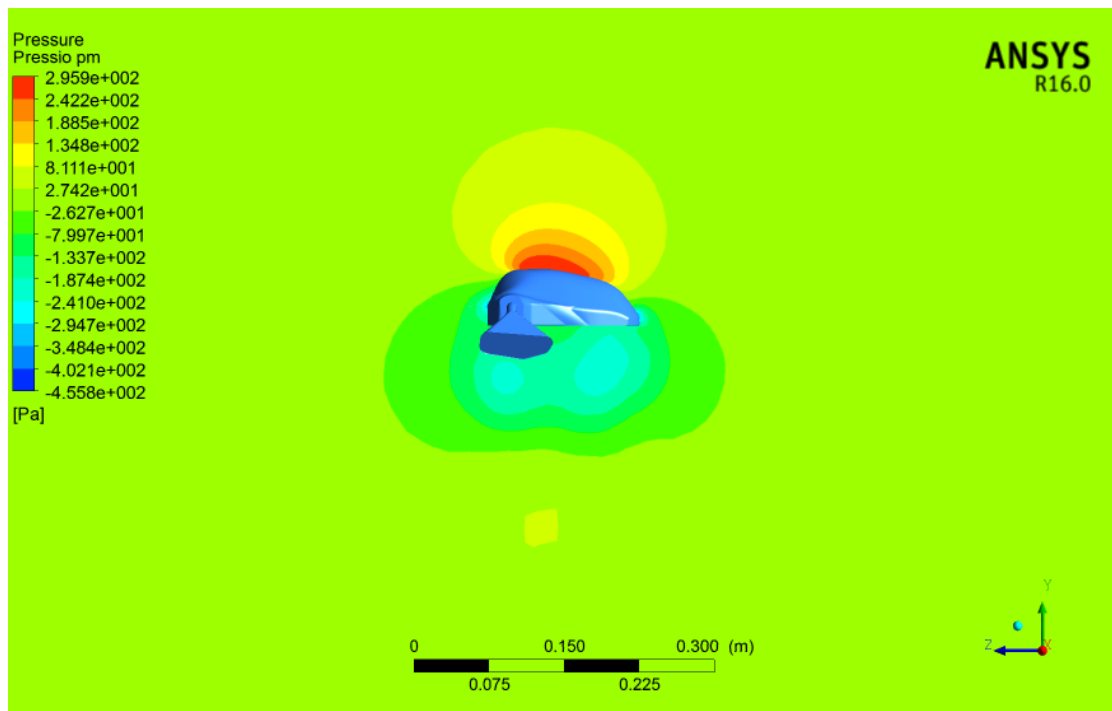


Figura 8.6. Distribució de pressions en l'anàlisi en CFX de la segona proposta.

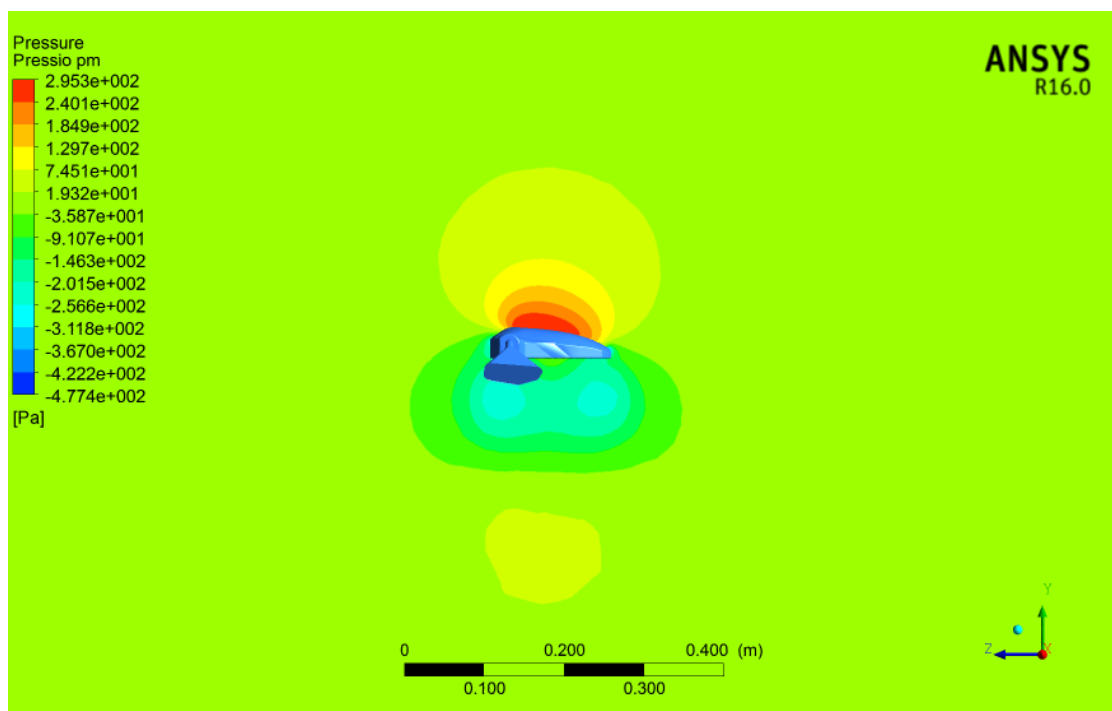


Figura 8.7. Distribució de pressions en l'anàlisi en CFX de la primera proposta.

En resum, s'ha millorat el disseny del retrovisor i s'ha aconseguit disminuir el c_D fins a **0,64**.

Amb aquesta millora de c_D es pot calcular la **potència** que s'estalvia l'automòbil per superar la resistència a l'avanç que produeix cada retrovisor. La potència necessària per superar aquesta força (d'un sol retrovisor), en Watts, es defineix com:

$$P_{drag} = F_D \cdot v \quad (\text{Eq. 8.1})$$

De l'equació 8.1 i de l'equació del c_D (4.3) es dedueix la relació entre la **diferència de potència** que ha de realitzar el turisme (ΔP_{drag}) entre el nou c_D i l'original si les condicions del flux són les mateixes (densitat i velocitat del fluid, i àrea projectada del retrovisor en la direcció del flux):

$$\Delta P_{drag} = P_{drag,2} - P_{drag,1} = \frac{\rho v^3}{2} (c_{D,2} - c_{D,1}) \quad (\text{Eq. 8.2})$$

Aquesta equació es pot trobar deduïda en l'annex de la memòria.

En el cas del retrovisor analitzat s'ha aconseguit millorar el c_D des de 1,06 fins a 0,64. Per tant la potència que ens podem estalviar en la conducció del vehicle amb aquesta evolució del disseny és:

$$\Delta P_{drag} = \frac{0,014868 \cdot 1,19}{2} (0,64 - 1,06)v^3 = -3,723 \cdot 10^{-3} v^3 \text{ [W]}$$

L'estalvi de potència depèn principalment de la velocitat del vehicle i es pot calcular amb l'equació anterior. Per exemple, quan l'automòbil circuli a 80 km/h la potència necessària per mantenir aquesta velocitat serà **81,71 W** menys amb el nou disseny del retrovisor.

$$\Delta P_{drag,2 \text{ retrovisors}} = 2 \cdot -3,723 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{80}{3,6}\right)^3 = -81,71 \text{ W}$$

L'estalvi de potència és directament proporcional al cub de la velocitat, en unitats del SI. Per tant, a velocitats elevades aquesta potència pot ser considerable. Aquesta relació potència estalviada-velocitat està representada en la *figura 8.8*.

Es pot comprovar com a velocitats petites inferiors a 50 *km/h* la millora del retrovisor no influeix gaire en l'eficiència aerodinàmica del vehicle, però a velocitats elevades al voltant de 100 *km/h* si que és considerable aquesta millora. Fins i tot, si el vehicle circulés a una velocitat d'aproximadament 160 *km/h* l'estalvi podria arribar a ser de 1 CV.

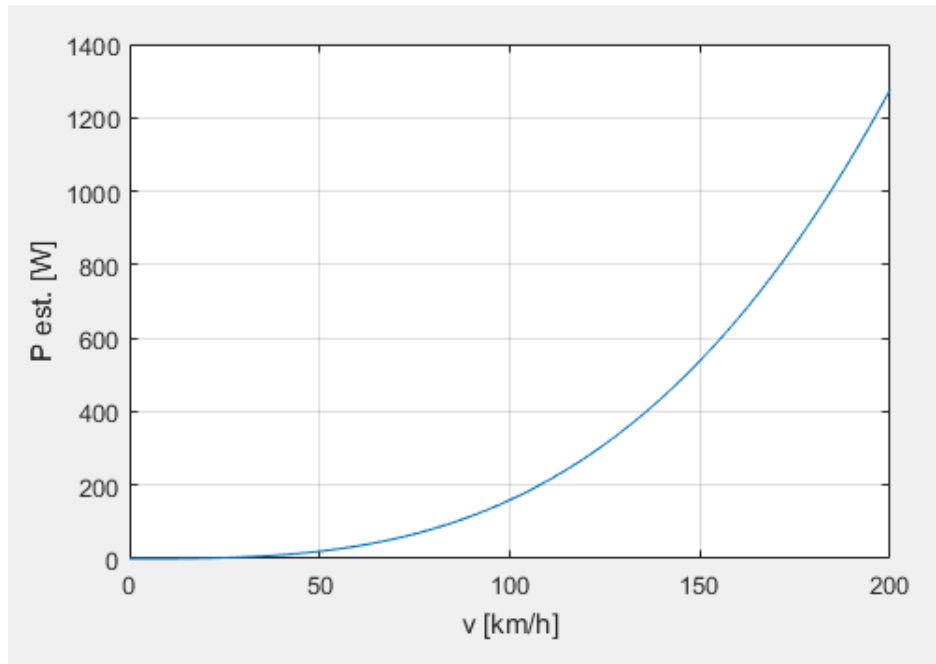


Figura 8.8. Potència estalviada en funció de la velocitat, en la millora del disseny del retrovisor. (Font: elaboració pròpia)

És important recordar que aquests càlculs són certs només si el número de Reynolds del flux es manté dins de la zona on el c_D és constant en funció d'aquest.

En resum, com es pot observar, si es millora el c_D dels retrovisor **es pot arribar a augmentar l'eficiència aerodinàmica del cotxe.**

La intenció d'aquest treball era modelar el prototip dissenyat i analitzar-lo en el túnel de vent, però aquesta part no s'ha pogut realitzar degut a que el túnel de vent es va espatllar durant l'experimentació del disseny base.

9. Planificació temporal

En aquest apartat es recull la planificació del projecte i el nombre total de hores dedicades a cada secció del treball.

S'ha creat un digrama de Gant (*figura 9.1*) amb la planificació temporal. En la primera columna de la taula apareixen les seccions del treball i en la segona les hores dedicades per cada una d'elles. En total s'han dedicat **304 hores** en realitzar el projecte.

El diagrama de Gant s'ha dividit en 28 setmanes (W+número de la setmana). La primera setmana (W1) és la del 29 de febrer al 3 de març i la setmana 28 és la del 4 al 10 de setembre. En l'annex 4 està recollit la correlació entre els números de les setmanes (WX) i el rang de dies en que consisteix la setmana corresponent.

Seccions del projecte	Hores	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8	W 9	W 10	W 11	W 12	W 13	W 14	W 15	W 16	W 17	W 18	W 19	W 20	W 21	W 22	W 23	W 24	W 25	W 26	W 27	W 28
Planificació	4																												
Definició abast i objectius	5																												
Definició de la metodologia emprada	15																												
Definició de la geometria del retrovisor	24																												
Preparar el mirall per l'experimentació	18																												
Creació del mirall en Solidworks	36																												
Explicar la base teòrica	11																												
Experimentació en el túnel de vent	3																												
Mallar el model en CFD	6																												
Estudi dels resultats del túnel de vent	28																												
Estudi del mirall amb el CFD	41																												
Comparació dels resultats dels 2 mètodes	20																												
Creació de noves propostes de disseny	32																												
Estudi en CFX de les propostes	26																												
Pressupost i impacte ambiental	10																												
Conclusions de l'estudi	15																												
Presentació adequada dels resultats	10																												
TOTAL	304																												

Figura 9.1. Diagrama de Gant de la planificació temporal del projecte. (Font: elaboració pròpia)

10. Pressupost

10.1. Consideracions prèvies

A continuació es presenta el pressupost d'aquest treball final de grau, que consta de quatre seccions:

- **Mesures:** es defineixen tots els conceptes que es tenen en compte en l'estudi, quantificats per unitats.
- **Preus unitaris:** es quantifiquen cada un dels conceptes mitjançant taules amb els preus unitaris segons les unitats de cada concepte.
- **Pressuposts parcials:** són els pressuposts dels diferents tipus de costs: recursos humans i materials/cost de l'experimentació.
- **Pressupost global:** resum total de tots els conceptes pressupostats.

10.2. Mesures

Les unitats de mesura dels conceptes inclosos en el pressupost són els de la *taula 10.1*.

Concepte	Unitats de mesura	Quantitat
Retrovisor	Número de retrovisors	1
Cargols i femelles	Número d'elements	3
Temps enginyer junior	Hores	304
Llicència Solidworks	Anys	0,75
Llicència ANSYS CFX	Anys	0,75
Llicència Microsof Office 2016	Anys	0,75
Energia utilitzada pel túnel de vent	KWh	27,58
Ordinador portàtil	Número d'ordinadors	1

Taula 10.1. Unitats de mesura dels conceptes del pressupost.

10.2. Preus unitaris

Els preus per unitat dels conceptes recollits en la taula anterior són els següents:

Concepte	Preus unitaris
Retrovisor	20 €
Cargols i femelles	0,5 €
Temps enginyer junior	10 €
Llicència Solidworks	1295 €
Llicència ANSYS CFX	5512 €
Llicència Microsoft Office 2016	49,95 €
Energia utilitzada pel túnel de vent	0,107055 €
Ordinador portàtil	400 €

Taula 10.2. Preus unitaris dels conceptes del pressupost.

10.3. Pressuposts parcials

Els costos del treball estan dividits entre els recursos humans i els costos dels materials i de l'experimentació, ja que alguns tenen amortització.

COST DELS RECURSOS HUMANS			
Concepte	Unitats	Preu unitari	Cost [€]
Temps enginyer junior	304	10	3004
Cotització seguretat social	28,3%		850,13
TOTAL			3854,13

[13]

Taula 10.3. Costos dels recursos humans.

COST DELS MATERIALS I DE L'EXPERIMENTACIÓ					
Concepte	Costs	Anys amortització	Amortització anual	Unitats	Amortització acumulada
Material d'experimentació					
Retrovisor	20				20
Cargols i femelles	1,5				1,5
Ordinador portàtil	400	4	100	0,67	67
Software					
Llicència Solidworks	1295	1	1295	0,67	865,65
Llicència ANSYS CFX*	5512	1	5512	0,67	3693,04
Llicència Microsof Office 2016	49,95	1	49,95	0,67	33,47
Cost de l'experimentació					
Energia utilitzada pel túnel de vent	2,97				2,97
Potència elèctrica**	4,45				4,45
TOTAL					4688,08

Taula 10.4. Costs dels materials i de l'experimentació.

*Cost de la versió estàndard d'ANSYS CFX.

**Cost de la potència elèctrica calculat com el cost de la potència contractada d'un dia d'una tarifa 3.0 (més d 15 kW contractats). Aquestes potències són de 19,919 KW (25 CV normalitzada) pels 3 períodes, encara que es podria optimitzar si no es realitzen experiments per la nit. El cost sense marge de la potència per kW contractat i any és $P1=40,7288\text{€}$, $P2=24,4373\text{€}$ i $P3=16,2915\text{€}$. Preus de l'energia i potència obtinguts de la comercialitzadora d'energia HolaLuz.com.

10.4. Pressupost global

El cost del total del projecte està recollit en la *taula 10.5*. S'ha aplicat el valor estàndard de Despeses Generals (GG), un 13% del PEM (Pressupost de Execució Material), i el mateix del Benefici Industrial (BI), un 6% del PEM [14].

PRESSUPOST TOTAL	
Concepte	Cost[€]
Cost dels recursos humans	3854,13
Cost dels materials i de l'experimentació	4688,08
Pressupost de Execució Material (PEM)	8542,21
Despeses generals (13% PEM)	1110,49
Benefici Industrial (6% PEM)	512,53
Pressupost de Execució per Contracte (sense IVA)	10165,23
IVA (21%)	2134,70
Pressupost de Execució per Contracte	12299,93

Taula 10.5. Pressupost total del treball.

El cost total del projecte és de **12299,93** euros.

11. Impacte ambiental

Aquest apartat no es centra en l'impacte ambiental del retrovisor com a element del cotxe, sinó en l'impacte del projecte en si, que es pot dividir principalment per el causat per l'experimentació en el túnel de vent i el causat per l'estudi amb simulació numèrica.

L'impacte ambiental del projecte en general és petit comparat amb altres estudis on es dediquen molts recursos a l'experimentació. Això és gràcies a que una gran part de l'estudi s'ha realitzat amb la simulació numèrica, on la única despesa de recursos és la energia consumida per l'ordinador.

Tal com s'ha dit, hi ha una despesa considerable d'energia a l'hora d'experimentar amb el túnel de vent. També es necessita unes instal·lacions prou grans per realitzar els experiments. Per tant, aquesta experimentació seria la part del treball que afectaria més el medi ambient. Tanmateix, aquest consum no és massa gran, ja que el temps d'experimentació és petit perquè es va preparar l'experimentació amb anterioritat per amortitzar millor el temps.

L'experimentació en el túnel de vent va durar 90 minuts. Considerant que la potència màxima del túnel és de 25 CV (18,39 kW) (annex 3), i que segons dades històriques el coeficient emissions $\text{kgCO}_2/\text{energia final (kWh)}$ és de 0,372 [12], les emissions de CO_2 degudes a l'experimentació són d'aproximadament de **10,26 kg de CO_2** . Aquest càlcul s'ha realitzat aproximant que el túnel treballa a potència màxima durant tota l'experimentació. Per tant el valor real és inferior a 10,26 kg de CO_2 .

Pel que fa els materials utilitzats, la utilització del retrovisor té un impacte ambiental nul, ja que és de segona mà i de un model de cotxe que ara no es fabrica, és a dir, s'ha reciclat a l'hora de realitzar l'estudi. No obstant, si es volgués estudiar un retrovisor d'un model nou de turisme s'hauria d'intentar reciclar-lo al finalitzar l'estudi, ja que la seva fabricació té un consum de recursos elevat i l'assaig portat a terme no és destructiu.

Finalment, també s'ha realitzat tots els càlculs i redaccions amb ordinador per reduir al mínim la utilització de paper, i així, reduir també l'impacte ambiental del projecte.

Conclusions

Un cop finalitzat aquest treball es poden extreure diferents conclusions.

Primer de tot, a trets generals, s'ha demostrat que per el retrovisor estudiat els resultats obtinguts en les simulacions numèriques són bastant precisos en comparació amb els resultats obtinguts en l'experimentació en el túnel de vent. Gràcies a això es pot reduir costos en el disseny de nous prototips utilitzant la simulació en CFX, enlloc del túnel de vent.

Pel que fa el retrovisor, s'ha determinat que no està ben dissenyat, és a dir, la seva eficiència aerodinàmica podria ser més elevada (el seu coeficient de resistència a l'avanç, c_D , actual és molt elevat, 1,03). Els dos tipus d'anàlisis demostren que la geometria del retrovisor dificulta el flux de l'aire i es crea una zona de vòrtexs de mida considerable en la part posterior del mirall. També es demostra que per velocitats de l'aire aproximadament dins del rang [50, 120] km/h el c_D és constant, o el que es el mateix, no depèn del número de Reynolds.

Finalment, després de crear nous prototips de retrovisor i analitzar-los, s'ha pogut aconseguir-ne un amb un coeficient de resistència a l'avanç quasi bé la meitat que l'original sense modificar l'àrea del mirall original. Això s'ha aconseguit arrodonint la superfície de la carcassa, que facilita la circulació del flux al voltant del retrovisor, creant una estela més petita.

Per a futures accions per seguir aquest treball es podria modelar el prototip en que s'optimitza el disseny inicial i es podria estudiar en el túnel de vent per comprovar que la millora és efectivament la obtinguda en les simulacions.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] M. WHITE, Frank. Mecánica de Fluidos. 6ª edición. Madrid: McGraw Hill, 2013.
- [2] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of Road Vehicles. Cambridge: ButterWorth-Heinemann, 1987.
- [3] CARANDDRIVERTHEF1.COM. Simulación CFD y Túnel de viento.
<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2007/06/23/simulacion-cfd-y-tunel-viento>
- [4] DERIVATIVESINVESTING.NET. External Flows: Basics, Flow Around Blunt Bodies and Flow Around Airfoils. <http://www.derivativesinvesting.net/article/120238687/external-flows-basics-flow-around-blunt-bodies-and-flow-around-airfoils/>
- [5] ARNAIZ FRANCO, CARMEN; DÍAZ OJEDA, EMILIO. OpenCourseWare Universidad de Sevilla. "SEPARACIÓN DE CAPA LÍMITE Y FORMACIÓN DE ESTELA".
http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema3/pagina_12.htm
- [6] LYDIA. Blog Juan de la Cuerva. "CAPA LÍMITE".
<http://juandelacuerva.blogspot.com.es/2008/03/capa-lmite.html>
- [7] CFD Online. Dimensionless wall distance (y plus). [http://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_\(y_plus\)](http://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_(y_plus))
- [8] MARÍN, VÍCTOR. Mecánica de Fluidos y Recursos Hidráulicos. "TUNEL DE VIENTO"
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/flujodegases/tuneldeviento/tuneldeviento.html>
- [9] EcuRed. Túnel aerodinámico.
http://www.ecured.cu/T%C3%BAnel_aerodin%C3%A1mico
- [10] KARAN, PRABA. Aeronautical Lecturing Notes. "Forces of Flight Lift Equation-Drag Equation- L/D relation" <http://aeronauticallecture.blogspot.com.es/2013/12/forces-of-flight.html>

- [11] DIAZ OLMO, JM. Angeles en la Cabeza. "EL TÚNEL DE VIENTO, EL GRAN DESCONOCIDO" <http://angelesenlacabeza.blogspot.com.es/2012/10/tuneles-de-viento-ese-gran-desconocido.html>
- [12] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. "Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España." Pàg 26
http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/propuestas/Documentos/2014_03_03_Factores_de_emision_CO2_y_Factores_de_paso_Efinal_Eprimaria_V.pdf
- [13] MINISTERIO DE EMPLEO Y SEGURIDAD SOCIAL. "Bases y tipos de cotización 2016" http://www.seg-social.es/Internet_1/Trabajadores/CotizacionRecaudaci10777/Basesytiposdecotiza36537/index.htm
- [14] Universidad de Castilla-La Mancha. "Las mediciones y el presupuesto" pàg 2.
https://www.uclm.es/area/ing_rural/AsignaturaProyectos/Tema%208.pdf
- [15] CIMBALA, John M.; ÇENGEL, Yunus A. "Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones", 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9

Bibliografia complementària

ANSYS Inc. Introduction to ANSYS CFX. Release 14.5. ANSYS Inc, 2012.

Estudi d'un retrovisor lateral amb simulació numèrica
i amb l'experimentació en un túnel de vent

A.**ANNEX****A.1. Resultats de les simulacions amb CFD del disseny base per diferents velocitats**

En aquest apartat s'exposa els resultats de les diferents simulacions realitzades amb CFX del disseny base. Els paràmetres de simulació són els mateixos que els explicats en la memòria per totes les simulacions, excepte la velocitat de l'inlet. En la *taula A.1* hi ha recollits aquests resultats numèrics:

Re	velocitat [km/h]	C _D
$4,7 \cdot 10^4$	67,5	1,036
$5,5 \cdot 10^4$	80	1,027
$7,0 \cdot 10^4$	100	1,029
$7,7 \cdot 10^4$	110	1,025
$8,3 \cdot 10^4$	120	1,028
$1,4 \cdot 10^5$	200	0,965

Taula A.1. Resultats de les simulacions en CFX per les diferents velocitats.

En la *figura A.1* es representen aquests punts. Es pot veure com la variació de C_D és baixa per Re inferiors a 10^5 i hi ha un canvi de magnitud considerable quan el Re passa a ser $1,4 \cdot 10^5$.

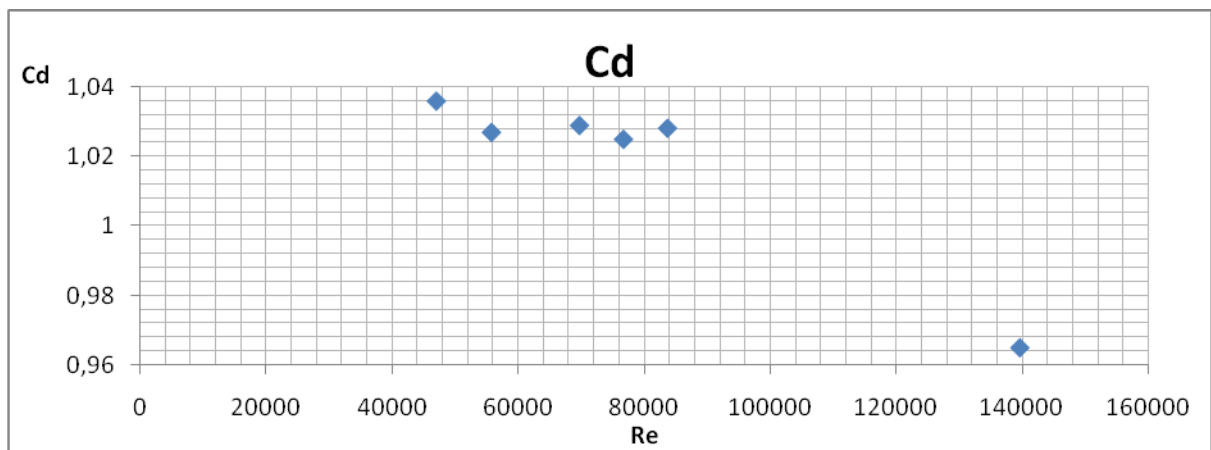


Figura A.1. Representació del C_d del retrovisor segons el número de Reynolds a partir de les simulacions en CFX.

A.2. Deducció de l'equació 8.2

Sabent que la potència necessària per vèncer la força de resistència a l'avanç (F_D) quan un objecte es mou a velocitat v és:

$$P_{drag} = F_D \cdot v$$

I que la força de resistència a l'avanç està relacionada amb el c_D per:

$$F_D = \frac{c_D \rho A v^2}{2}$$

Considerem la hipòtesis de dos objectes amb la mateixa àrea projectada en la direcció del flux (A) que estiguin envoltats d'un flux de les mateixes característiques de densitat i velocitat (ρ i v), però amb dos coeficients de resistència a l'avanç diferents: $c_{D,1}$ i $c_{D,2}$.

La potència necessària per vèncer la F_D de cada cos és:

$$P_{drag,1} = F_{D,1} \cdot v$$

$$P_{drag,2} = F_{D,2} \cdot v$$

Com que tenen diferents c_D la F_D serà diferent en els dos objectes si es mouen a la mateixa velocitat.

Per altra banda, com que en la hipòtesis s'ha definit les variables A , ρ i v com les mateixes en els dos casos la relació F_D - c_D serà la mateixa pels dos objectes que anomenarem K_{ra} :

$$\frac{F_{D,1}}{c_{D,1}} = \frac{F_{D,2}}{c_{D,2}} = \frac{A \rho v^2}{2} = K_{ra}$$

Llavors si restem la potència dels dos objectes s'obindrà la potència que s'estalvia un quan

Estudi d'un retrovisor lateral amb simulació numèrica
i amb l'experimentació en un túnel de vent

utilitza el segon objecte:

$$\Delta P_{drag} = P_{drag,2} - P_{drag,1} = (F_{D,2} - F_{D,1})v = (K_{ra} c_{D,2} - K_{ra} c_{D,1})v = (c_{D,2} - c_{D,1})v K_{ra}$$

A.3. Dades tècniques del túnel de vent

VENTILADOR:	10 Pales, diàmetre 1100/460. Secció útil 0,78 m² i 8 àleps directrius	
MOTOR HIDRÀULIC:	MAC 03321N00 V280 (34,8 cm³/volta)	
	DENISON	60,9 l/min a 175 bar girant a 1450 rpm
		62,2 l/min a 140 bar girant a 1520 rpm
		Màxima pressió a catàleg 175 bar
BOMBA HIDRÀULICA:	TIC 01421R02V16B	girant a 1500 rpm
	DENISON	60,9 l/min a 175 bar girant a 28,1 CV
		62,2 l/min a 140 bar girant a 22,5 CV
		Màxima pressió a catàleg 175 bar
MOTOR ELÈCTRIC:	25 CV a 1500 rpm	
SECCIÓ NOMINAL:	0,5 m², interna lliure 0,25 m²	
VELOCITAT MÀXIMA GARANTIDA A LA CAMBRA D'ASSAIG:	60 m/s	
VELOCITAT MÍNIMA:	2 m/s	
CABAL MÀXIM D'AIRE:	30 m/s	
CAPACITAT NOMINAL DEL REGULADOR DE CABAL:	Tipus FC 0632102	53 l/min
		Màxima pressió 210 bar
CAPACITAT NOMINAL EL DISTRIBUÏDOR PRINCIPAL:	Tipus DI 3310105037002	D12 Màxima pressió 210 bar
VELOCITAT MITJANA A TRAVÉS DEL VENTILADOR A CABAL MÀXIM:	38,5 m/s	

Estudi d'un retrovisor lateral amb simulació numèrica
i amb l'experimentació en un túnel de vent

ENERGIA **CINÈTICA** $V^2/2g=76 \text{ m}$
CORRESPONENT:

A.4. Correlació número de setmanes/dies del diagrama de Gant

Codi setmana	Setmana
W1	29/2-6/3
W2	7/3 - 13/3
W3	14/3 - 20/3
W4	21/3 - 27/3
W5	28/3 - 3/4
W6	4/4 - 10/4
W7	11/4 - 17/4
W8	18/4 - 24/4
W9	25/4 - 1/5
W10	2/5 - 8/5
W11	9/5 - 15/5
W12	16/5 - 22/5
W13	22/5 - 28/5
W14	29/5-4/6
W15	5/6-11/6
W16	12/6-18/6
W17	19/6-25/6
W18	26/6-2/7
W19	3/7-9/7
W20	10/7-16/7
W21	17/7-23/7
W22	24/7-30/7
W23	31/7-6/8
W24	7/8-13/8
W25	14/8-20/8
W26	21/8-27/8
W27	28/8-3/9
W28	4/9-10/9

Taula A.4.